



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

ELLI KINNUNEN  
KUSTANNUSTEN OPTIMOINTI ENERGIANKULUTUKSEN JA  
KASVIHUONEKAASUPÄÄSTÖJEN NÄKÖKULMASTA BETONI-  
JULKISIVUJEN KORJAUSHANKKEISSA

Diplomityö

Tarkastaja: professori Matti Pentti  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
Talouden ja rakentamisen tiedekun-  
nan varadekaanin päätöksellä 27.  
maaliskuuta 2017

## TIIVISTELMÄ

**KINNUNEN, ELLI:** Kustannusten optimointi energiankulutuksen ja kasvihuonekaasupäästöjen näkökulmasta betonijulkisivujen korjaushankkeissa

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 39 sivua

Huhtikuu 2017

Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Rakennesuunnittelu

Tarkastaja: professori Matti Pentti

Avainsanat: elinkaarikustannukset, korjausstrategia, energiankulutus, kasvihuonekaasupäästö, elinkaari, mallinnus

Tiukentuvat energiankulutuksen ja kasvihuonekaasupäästöjen määräykset ohjaavat enemmässä määrin rakentamista. Suomessa rakennuskanta uudistuu hitaasti, joten korjausrakentamisella on suuri merkitys rakennuskannan energiankulutuksen ja siitä aiheutuvien päästöjen alentamisessa. Tässä tutkimuksessa verrataan kolmen betonijulkisivujen korjausstrategian vaikutusta kahden kohderakennuksen energiankulutukseen, kasvihuonekaasupäästöihin ja elinkaarikustannuksiin 40 vuoden aikajaksolla. Korjausstrategioiden energiankulutus, kasvihuonekaasupäästöt ja elinkaarikustannukset mallinnettiin laskenta- ja simulointiohjelmilla, eikä tutkimuksen yhteydessä tehty kenttämittauksia. Tutkimuksessa havaittiin, että korjausstrategia, jossa rakennuksen julkisivut eristerapataan, on strategioista energiatehokkain, elinkaarikustannuksiltaan edullisin ja tuottaa vähiten kasvihuonekaasupäästöjä. Merkittävin vaikutus energiamallinnuksen tarkkuuteen oli lähtötietojen tarkkuudella. Julkisivutarkastelussa rakennuksen julkisivut tuli mallintaa tarkasti ja sisätilat tuli jakaa kerroksiin, jotta mallin riittävä tarkkuus saavutettiin. Mallinnustavalla ja ohjelmantarkkuudella ei juuri ollut vaikutusta energiasimuloinnin tulokseen. Lämmitysenergian tuotannossa käytettävän polttoaineen valinnalla oli suurin vaikutus kasvihuonekaasupäästöihin. Kivihiilellä ja maakaasulla tuotetun energian päästöt korostuvat, kun taas biomassalla tuottaessa myös materiaalivalinnoilla oli merkitystä. Tutkimusta tarkasteltaessa on huomattava, että tulokset perustuvat matemaattisiin laskentoihin ja simulointeihin, joissa jouduttiin tekemään arvioita, yksinkertaistuksia ja rajanvetoja. Siksi tuloksiin on suhtauduttava kriittisesti.

## ABSTRACT

**KINNUNEN, ELLI:** Cost Optimisation in Renovation of Concrete Facades from Energy Consumption and Green House Gas Emissions Point of View

Master of Science Thesis, 39 pages

April 2017

Master's Degree Programme in Civil Engineering

Major: Structural design

Examiner: Professor Matti Pentti

**Keywords:** life cycle costs, renovation strategy, energy consumption, green house gas emission, life cycle, modelling

Stricter regulations in energy consumption and greenhouse gas emissions control construction with increasing extent. Finland's building stock is renewed slowly, so the repair-construction has a very important role in lowering the energy consumption and the associated emissions of buildings. This paper compares the impact of three renovation strategies for concrete facades. Two reference buildings were used and the comparables were energy consumption, greenhouse gas emissions and life cycle costs for 40-year period. Energy consumption, greenhouse gases and costs of the repair strategies were modeled using computing and simulation programs. No investigation of field measurements was made. It was found that the repair strategy of external insulation and plaster was the most energy efficient, had the lowest life cycle costs, and produced the least green house gases. The output data accuracy had the most significant impact on the energy modeling accuracy. In the analysis of the building facades, façade should be modeled accurately and interior should be divided to layers to obtain sufficient accuracy of the model. The modeling method and the accuracy of the software had almost no impact on energy simulation results. By selecting the fuel used for heating energy production had the greatest effect on greenhouse-gas emissions. The emissions of the energy produced by hard coal and natural gas were emphasized, while producing energy by biomass, material choices were relevant. It is to be noted that the results base on mathematical calculations and simulations, where estimations and simplifying needed to be made. Therefore, the results must be viewed critically.

## ALKUSANAT

Tämä työ on tehty valtavan innostuksen siivittämänä. Innostusta haettiin vaihtovuonna Lundin yliopistosta Ruotsista, ja sinne minut ohjasi Jukka Lahdensivu. Kiitos Jukka, että avasit tulevaisuudelleni uuden oven. Sain tukea vaihtopäätöksessäni, niin kuin kaikessa muussakin tekemisessäni, myös esimieheltäni, Mikko Tarrilta, joka on armollisesti ottanut minut siipiensä suojaan. Mikolle, kuten myös Saija Varjoselle ja Arto Köliölle kuuluu iso kiitos kiinnostuksesta tutkimuksen etenemistä kohtaan ja mentoroinnista tiukoissa paikoissa. Tämä on ollut hyvää tiimipelaamista lokakuusta asti. Kiitos Matti Pentille tutkimuksen kommentoinnista ja avusta tutkimuksen hyväksyttämisen prosessissa. Kiitos Anssi Savisaarelle vertaistuesta ja Marko Laitiselle Dynamic Duosta. Thank you, Anton Hendrix, for being my time manager. Kiitos perhe ja ystävät, jotka olette tukeneet kouluurani aikana. Erityismaininta ja papukaijamerkki ihanalle Jannelleni siitä, että olet pysynyt mukana kaikissa tempauksissani, niin opiskelemaan lähdössä kuin Ruotsiin muutosakin.

Tampereella, 20.4.2017

Elli Kinnunen

# SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
1.1	Tausta.....	1
1.2	Tavoite ja rajaukset.....	1
1.3	Tutkimusmenetelmät ja tutkimuksen suoritus.....	1
2.	TAUSTATEORIA .....	3
2.1	Tiukentuvat energia- ja päästömääräykset.....	3
2.2	Energian tuotanto ja hinnat .....	4
2.3	Korjausratkaisut.....	5
2.3.1	Pinnoitus- ja paikkauskorjaus .....	5
2.3.2	Eristerappaus .....	6
2.3.3	Purkaminen ja uudelleenverhous .....	7
2.4	Mallinnukset.....	7
2.4.1	Energiamallinnus .....	7
2.4.2	Elinkaariarviointi .....	8
3.	AINEISTO JA TUTKIMUKSEN SUORITUS .....	10
3.1	Kohteet.....	10
3.2	Energiamalli .....	11
3.2.1	Mallin kalibrointi .....	12
3.2.2	Korjausratkaisujen jälkeinen lämmitysenergiankulutus .....	18
3.3	Korjausstrategioiden elinkaaritarkastelu.....	19
3.3.1	Elinkaarikustannukset .....	20
3.3.2	Elinkaaripäästöt .....	21
3.4	Herkkyystarkastelu .....	25
3.4.1	Energiamalli.....	25
3.4.2	Kustannukset .....	25
3.4.3	Päästöt .....	26
4.	TULOKSET.....	27
4.1	Energiamallin kalibrointi .....	27
4.2	Korjausratkaisujen lämmitysenergiankulutus .....	28
4.3	Elinkaarikustannukset.....	29
4.4	Elinkaaripäästöt .....	30
4.5	Herkkyystarkastelu .....	33
4.5.1	Energiankulutus .....	33
4.5.2	Kustannukset .....	33
4.5.3	Päästöt .....	35
5.	JOHTOPÄÄTÖKSET .....	37
5.1	Tulosten tarkastelu.....	37
5.2	Tutkimuksen tarkastelu.....	37
5.3	Jatkotutkimusehdotukset.....	39
	LÄHDELUETTELO.....	40

## KUVALUETTELO

<i>Kuva 2.1 Kaukolämmön tuotantomuotojen osuus Suomessa .....</i>	<i>4</i>
<i>Kuva 2.2 Kaukolämmön hinta kerrostaloissa puolivuositain .....</i>	<i>5</i>
<i>Kuva 3.1 Tutkimusprosessin kulku .....</i>	<i>10</i>
<i>Kuva 3.2 Energiamallin tarkkuuden hakeminen .....</i>	<i>13</i>
<i>Kuva 3.3 Laatikko-malli, jossa koko rakennus yhtenä vyöhykkeenä .....</i>	<i>14</i>
<i>Kuva 3.4 Kerros-malli, jossa kerrokset vyöhykkeinä .....</i>	<i>14</i>
<i>Kuva 3.5 Erkkeri-malli, jossa kerrokset muodostavat omat vyöhykkeensä .....</i>	<i>15</i>
<i>Kuva 3.6 Sisäänvedetty maantasokerros -malli .....</i>	<i>15</i>
<i>Kuva 3.7 Tila-malli, jossa vyöhykkeitä yhteensä 31 .....</i>	<i>16</i>
<i>Kuva 3.8 Laatikko-malli, jossa kolme vyöhykettä .....</i>	<i>16</i>
<i>Kuva 3.9 Laatikko-malli kattoikkunoineen .....</i>	<i>17</i>
<i>Kuva 3.10 Kerros-malli, jossa viisi vyöhykettä .....</i>	<i>17</i>
<i>Kuva 3.11 Sisäänvedetty maantasokerros-malli .....</i>	<i>18</i>
<i>Kuva 3.12 Korjausstrategioiden käyttöiät ja huoltojaksot .....</i>	<i>19</i>
<i>Kuva 3.13 Strategia 1, LCI-malli asuinkerrostalo (yllä) ja toimistorakennus .....</i>	<i>23</i>
<i>Kuva 3.14 Strategia 2, LCI-malli asuinkerrostalo (yllä) ja toimistorakennus .....</i>	<i>24</i>
<i>Kuva 3.15 Strategia 3, LCI-malli asuinkerrostalo (yllä) ja toimistorakennus .....</i>	<i>25</i>
<i>Kuva 3.16 Energian tuotannon raaka-aineena kivihiili .....</i>	<i>26</i>
<i>Kuva 3.17 Energian tuotannon raaka-aineena maakaasu .....</i>	<i>26</i>
<i>Kuva 4.1 Asuinkerrostalon (vas.) ja toimistorakennuksen energiamallien kalibrointien tulokset .....</i>	<i>27</i>
<i>Kuva 4.2 Asuinkerrostalon vuotuinen lämmitysenergiankulutus nykyhetken korjauksen jälkeen verrattuna tilanteeseen ennen korjausta .....</i>	<i>28</i>
<i>Kuva 4.3 Toimistorakennuksen vuotuinen lämmitysenergiankulutus nykyhetken korjauksen jälkeen verrattuna tilanteeseen ennen korjausta .....</i>	<i>29</i>
<i>Kuva 4.4 Korjausratkaisujen elinkaarikustannukset 40 vuoden aikana .....</i>	<i>30</i>
<i>Kuva 4.5 Asuinkerrostalon korjausstrategioiden kasvihuonekaasupäästöt hiilidioksidiekvivalentteina julkisivuneliötä kohti 40 vuoden aikana .....</i>	<i>31</i>
<i>Kuva 4.6 Toimistorakennuksen korjausstrategioiden kasvihuonekaasupäästöt hiilidioksidiekvivalentteina julkisivuneliötä kohti 40 vuoden aikana .....</i>	<i>32</i>
<i>Kuva 4.7 Korjausstrategioiden elinkaarikustannusten herkkyystarkastelu 40 vuoden pitoajalla .....</i>	<i>34</i>
<i>Kuva 4.8 Korjausstrategioiden elinkaarikustannusten herkkyystarkastelu 20 vuoden pitoajalla .....</i>	<i>35</i>
<i>Kuva 4.9 Elinkaaripäästöjen vertailu kaukolämmön tuotannon eri polttoaineilla .....</i>	<i>36</i>

## TAULUKKOLUETTELO

<i>Taulukko 2.1 Energiatehokkuuden parantamisen vaihtoehtoiset vaatimukset .....</i>	<i>4</i>
<i>Taulukko 3.1 Kohdetiedot .....</i>	<i>11</i>
<i>Taulukko 3.2 Käytetyt rakenteet .....</i>	<i>19</i>
<i>Taulukko 3.3 Korjausratkaisujen hankintakustannusten lähtöarvot .....</i>	<i>20</i>
<i>Taulukko 3.4 Korjausstrategioiden energiankulutukset julkisivuneliötä kohti 40</i> <i>vuoden aikana.....</i>	<i>22</i>
<i>Taulukko 3.5 Käytetyt menekit LCI-malleissa.....</i>	<i>22</i>
<i>Taulukko 4.1 Ohjelman tarkkuuden ja mallinnustavan vaikutukset</i> <i>energiasimuloinnin tuloksiin .....</i>	<i>33</i>
<i>Taulukko 4.2 Korjausstrategioiden päästöt toimistorakennukselle kaukolämmön eri</i> <i>polttoaineilla .....</i>	<i>36</i>

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

CO <sub>2</sub> -ekv.	Hiilidioksidiekvivalentti, kuvaa muiden kasvihuonekaasujen GWP:a suhteessa hiilidioksidiin
Elinkaari-kustannukset	Investointi-, kunnossapito- ja energiakustannukset tarkastelujakson aikana
Elinkaaripäästöt	Materiaalien lämmitysenergian tuotannosta aiheutuvat kasvihuonekaasupäästöt tarkastelujakson aikana
Eristerappaus	verhoukorkorjaus, jolla peitetään vanha julkisivu eristeellä ja rappauksella
GWP	Global Warming potential, Ilmastonlämpenemispotentiaali
Kasvihuonekaasu	Kaasu, joka päästää auringon lämpösäteilyn maahan, mutta absorboi maasta heijastuvaa säteilyä itseensä
Kasvihuonekaasupäästöt	Materiaalien tai energian tuotannosta aiheutuva kasvihuonekaasujen vapautuminen ilmakehään
LCA	Life Cycle Assessment, Elinkaariarviointi
LCA-selvitys	Elinkaariarviointiselvitys
LCI-selvitys	Elinkaari-inventaarioselvitys
Paikkakorjaus	voidaan tarkoittaa saumakorjauksia, huoltomaalausta, pinnoitusta suojaavalla pinnoitteella tai perusteellista pinnoitus- ja paikkauskorjausta. Tässä tutkimuksessa käsitellään perusteellista pinnoitus- ja paikkauskorjausta



# 1. JOHDANTO

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli verrata kolmen julkisivukorjausstrategian kustannustehokkuutta lämmitysenergiankulutuksen ja kasvihuonepäästöjen näkökulmasta kahdessa eri kohteessa 40 vuoden aikana. Kohteina olivat asuinkerrostalo ja toimistorakennus, joissa molemmissa oli betoniset julkisivut. Julkisivujen korjausvaihtoehtoina olivat paikkakorjaus ja eristerappaus sekä kuorielementin purku ja eristeiden vaihto. Kohteiden ja korjausvaihtoehtojen energiankulutusta mallinnettiin IDA ICE -ohjelmalla, kasvihuonepäästöjä korjaushetkestä 40 vuoden tarkastelujaksolla Gabi-elinkaariohjelmalla ja elinkaarikustannuksia arvioitiin JUKO-ohjelmalla.

## 1.1 Tausta

Kiristyvät energiansäästö määräykset ovat rakentamisessa arkipäivää. Kiinteistön omistajan etuna on päästä määräykseen mahdollisimman kustannustehokkaasti ei vain investointivaiheessa vaan rakennuksen elinkaaren aikana. Tässä tutkimuksessa luodaan toimintatapa hyödynnettäväksi myöhempää käyttöä varten. Asiakkaiden pääintressinä on usein investointikustannus, mutta päätöksenteon tueksi vertaillaan kustannuksia, energiankulutusta sekä kasvihuonekaasupäästöjä korjauksen elinkaaren aikana.

## 1.2 Tavoite ja rajaukset

Ensimmäisenä alatavoitteena oli oppia käyttämään tutkimuksessa käytettyjä laskenta- ja simulointiohjelmia. Toisena tavoitteena oli löytää mallinnuksille ”riittävän tarkka” taso. Energiamallinnuksissa tällä tarkoitetaan sitä, että kohteiden mallinnuksessa otettiin huomioon ne seikat, jotka vaikuttivat nimenomaan betonijulkisivujen korjaukseen. Riittävä tarkkuustaso löytyy, kun tulokset eivät enää muutu, mutta mallinnukseen käytetty aika pitenee. Tulosten oikeellisuus ja toisaalta ohjelmien tehokas käyttö ovat yritysmaailmassa avainasemassa.

Tutkimuksen päätavoite oli löytää energiankulutuksen ja kasvihuonepäästöjen optimitaso korjaushankkeen elinkaarikustannusten kanssa. Tätä näkökulmaa voidaan ajatella kiinteistönomistajan arvostavan. Korjausratkaisuja oli kolme, joita sovellettiin kahden kohteeseen. Tutkimus suoritettiin tietokoneohjelmia käyttäen, eikä kohteilla tehty mittauksia esimerkiksi tulo- tai poistoilman lämpötiloista tai rakennusten kylmäsilloista.

## 1.3 Tutkimusmenetelmät ja tutkimuksen suoritus

Tutkimuksessa oli mallikohteina yksi asuinkerrostalo ja yksi toimistorakennus. Näiden kohteiden geometriaa ja rakennetietoja hyödynnettiin energiamallien rakentamisessa.

Energiamallia tarkennettiin pala palalta ja korjausratkaisut lisättiin niin sanotun referenssimallin (riittävän tarkka malli) päälle. Korjausten aiheuttamat kasvihuonepäästöt ja kustannukset arvioitiin korjaushetkestä 40 vuotta eteenpäin huoltojaksoineen. Tarkempi kuvaus tutkimuksen kulusta on esitetty luvussa 3 ja tulokset luvussa 4. Tulosten merkitystä ja tutkimukseen liittyvää epävarmuutta on pohdittu luvussa 5. Seuraavassa luvussa, luvussa 2, on käsitelty tutkimuksen taustoja.

## 2. TAUSTATEORIA

Tässä luvussa esitetään rakennusten julkisivukorjauksia ohjaavat määräykset energiatehokkuuden ja kasvihuonekaasupäästöjen näkökulmasta. Lisäksi avataan lämmitysenergian tuotantoa ja hintoja Suomessa sekä kuinka ne suhteutuvat muuhun Eurooppaan. Luvussa kerrotaan myös tutkimukseen valittujen korjausratkaisujen peruseräperiaatteet sekä mallinnusten toimintatavat.

### 2.1 Tiukentuvat energia- ja päästömääräykset

Rakennukset kuluttavat noin 40% Euroopan unionin kokonaisenergiankulutuksesta. Talonrakennusala on kasvussa, mikä tarkoittaa rakennusten energiankulutuksen kasvua. Öljytuotteet, maakaasu ja kiinteät polttoaineet, jotka ovat unionin alueella keskeisiä energianlähteitä, ovat myös suurimpia hiilidioksidipäästöjen aiheuttajia. Näin ollen rakennusten energiankulutusta pienentämällä ja siirtymällä uusiutuviin energianlähteisiin vähennetään unionin energiariippuvuutta ja kasvihuonepäästöjä. (Euroopan komissio, 2012) (Euroopan parlamentti, 2010).

Vuonna 2010 EU:ssa käynnistettiin Eurooppa 2020 kasvu- ja työllisyysstrategia älykkäälle, kestäväälle ja osallistuvalla kasvulla. Kestäväälle kasvulle Euroopan unioni on asettanut tavoitteeksi vähentää unionin kasvihuonepäästöjä ja energiankulutusta vuoden 1990 tasosta 20% vuoteen 2020 mennessä. Lisäksi uusiutuvan energian määrä kokonaismäärästä tulisi olla 20% ja energiatehokkuutta tulisi parantaa 20% (Euroopan komissio, 2012).

Suomen maakohtainen tavoite on leikata kasvihuonepäästöjä 16% vuoden 2005 tasosta ja käyttää 38% uusiutuvaa energiaa (Tilastokeskus, 2011) (Euroopan komissio, 2013). Vuoden 2015 lopussa Suomessa oli 1 505 138 rakennusta, joista 7 600 rakennettiin saman vuoden aikana eli rakennuskanta kasvoi 0,5%. Asuinkerrostalojen määrä oli kasvanut 0,8% kun taas toimistorakennusten määrä on pysynyt 2010 vuoden tasolla. Uudistuotannon osuus asuinkerrostalojen vuosituoannosta on pysynyt noin 1% luokassa vuodesta 2010 (Tilastokeskus, 2016) (Tilastokeskus, 2015) (Tilastokeskus, 2016). Näin ollen korjaamisella on tärkeä rooli rakennusten energiatehokkuuden parantamisessa ja päästöjen leikkaamisessa.

Direktiivissä 2010/31/EU määritetyt niin sanotut laajamittaiset korjaukset kuuluvat 2020-tavoitteiden piiriin. Laajamittaisilla korjauksilla tarkoitetaan rakennuksen vaipan tai teknisiin järjestelmiin liittyviä korjauksia, joiden kokonaiskustannukset ovat yli 25% rakennuksen arvosta rakennusmaan arvo pois lukien tai kun korjaus koskee yli 25%:a rakennuksen vaipan pinta-alasta. (Euroopan parlamentti, 2010).

Rakennuskohtaiset energiatehokkuusvaatimukset korjaus- ja muutostyössä annetaan Suomen ympäristöministeriön asetuksessa 4/13. Asetuksen mukaan korjaus- tai muutostyön tulee täyttää rakenneosakohtaiset lämmönläpäisykertoimien vaatimukset, rakennuksen energiankulutuksen vaatimukset tai kokonaisenergiankulutuksen vaatimukset

(Ympäristöministeriö, 2013). Vaatimustasot on esitetty taulukossa 2.1 asuinkerrostaloille ja toimistorakennuksille julkisivukorjaushankkeessa.

**Taulukko 2.1 Energiatehokkuuden parantamisen vaihtoehtoiset vaatimukset**

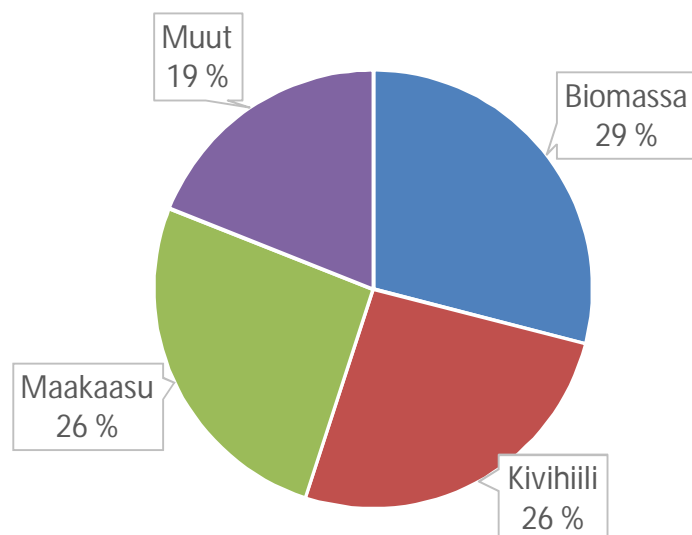
	Rakennusosakohtaiset vaatimukset, ulkoseinä	Energiankulutusvaatimukset	Kokonaisenergiankulutusvaatimukset
Asuinkerrostalo	Alkuperäinen U-arvo $\times 0,5$ kuitenkin enintään $0,17 \text{ W/m}^2\text{K}$	$\leq 130 \text{ kWh/m}^2$	E-vaadittu $\leq 0,85 \times \text{E-laskettu}$
Toimistorakennus		$\leq 145 \text{ kWh/m}^2$	E-vaadittu $\leq 0,7 \times \text{E-laskettu}$

Rakennuksen energiankulutusvaatimukseen lasketaan vuotuiset lämmityksen, sähkön ja jäähdytyksen kuluttamat energiat ilman kiinteistökohtaisen tai kiinteistön ulkopuolisen energiantuotannon häviöitä. Rakennuksen kokonaisenergiankulutukseen (E-luku) huomioidaan vuotuinen ostoenergia painokertoimilla laskettuna. (Ympäristöministeriö, 2011)

## 2.2 Energian tuotanto ja hinnat

Noin puolet rakennusten lämmitysenergiasta tuotetaan Suomessa kaukolämmöllä. Asuinkerrostaloissa ja toimistorakennuksissa kaukolämpö on vallitseva lämmöntuotantomuoto. (Heljo, 2005). Kaukolämmöstä taas 29% on tuotettu puulla tai muulla biomassalla ja noin neljännekset kivihiihellä ja maakaasulla. Loput kaukolämmöstä (noin viidennes) tuotetaan turpeella, öljyllä ja sekundäärilämmöllä (kuva 2.1). (Motiva, 2016)

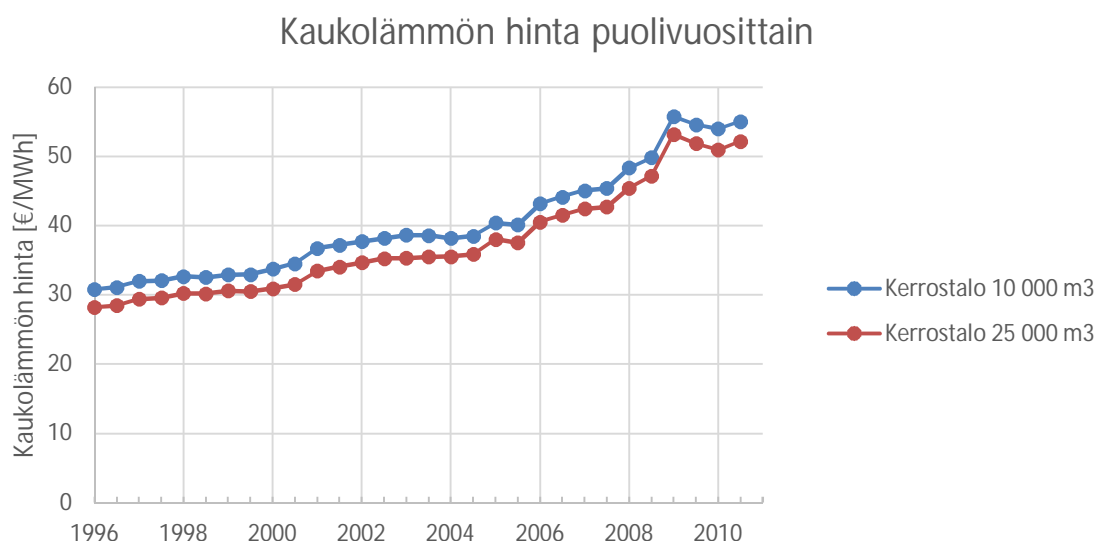
### Kaukolämmön tuotanto Suomessa



**Kuva 2.1 Kaukolämmön tuotantomuotojen osuus Suomessa**

Kaukolämmön hinta on noussut viimeisten vuosikymmenten aikana. Hinnan nousua on esitetty kuvassa 2.2. Vuosien 1996 ja 2011 välillä keskiuuren asuinkerrostalon kaukolämmön hinta megawattituntia kohti on kasvanut 75 prosentilla ja suuren 85 prosentilla.

Energianhinta on siis noussut noin 5% vuosittain. (Tilastokeskus, 2016) Mikäli energianhinta on jatkanut nousuaan samaa vauhtia, energian nykyhinnaksi (2016) voidaan arvioida 80 €/MWh eli 0,08 €/kWh. Energianhinnan jatkaessa nousuaan voi energianhinta 40 vuoden päästä teoriassa olla 0,58 €/kWh.



**Kuva 2.2 Kaukolämmön hinta kerrostaloissa puolivuositain**

Muualla Euroopassa energia on selkeästi kalliimpaa kuin Suomessa. Vuonna 2015 EU-maiden kalleinta kotitaloussähkö oli Tanskassa, jossa energianhinta veroineen oli noin 0,3 €/kWh, kun Suomessa se oli noin 0,15 €/kWh. EU:n kallein teollisuussähkö maksoi noin 0,15 €/kWh, kun Suomessa se oli puolet siitä. Maakaasun hinta oli kolmanneksen pienempi kuin Euroopan kallein hinta. (Eurostat, 2017)

## 2.3 Korjausratkaisut

Tutkimuksessa käsitellään kolmea betonijulkisivujen korjausratkaisua: pinnoitus- ja paikkauskorjaus, eristerappaus sekä kuorielementtien ja lämmöneristeiden purku ja uudelleen asentaminen. Lisäksi jokaisen korjausratkaisun elinkaaren aikana on otettu huomioon huoltomaalaus. Tässä luvussa esitellään tutkimukseen valittujen korjausratkaisujen määritelmät, peruseriaatteet, käytettävät materiaalit ja tuotteet sekä vaikutus rakennuksen energiatehokkuuteen.

### 2.3.1 Pinnoitus- ja paikkauskorjaus

Pinnoitus- ja paikkauskorjaus on luonteeltaan säilyttävä toimenpide, mikä tarkoittaa, ettei rakenteen rakennusfysikaalista toimintaa juuri muuteta. Korjauksen tavoitteena on alentaa kosteusrasitusta ja näin hidastaa vaurioiden syntymistä suojaavilla pinnoitteilla. Saman korjauksen yhteydessä voidaan uusia myös elementtisaumat ja/tai korjata julkisivupellityksiä ja räystäsrakenteita. Korjauksella ei paranneta julkisivun energiatehokkuutta.

Perusteellinen pinnoitus- ja paikkauskorjaus (myöh. paikkakorjaus) on korjausratkaisu, jolla korroosio- ja vaurioituneiden raudoitteiden lisäksi laastipaikataan myös sellaisia

kohtia, joissa vaurioituminen ei vielä ole silmämääräisesti havaittavissa, mutta joissa raudoitteet ovat lähellä ulkopintaa. Rajasyvyyden ulkopuolella raudoitteet piikataan näkyviin, puhdistetaan ruosteesta ja käsitellään ruosteenestolaastilla. Tämän jälkeen avattu kohta täytetään täyttölaastilla, oikaistaan ja pinnoitetaan. Menetelmällä voidaan käsitellä myös pieniä pakkasrapautuneita alueita.

Paikkauskorjausta käytetään silloin, kun julkisivun ulkonäkö halutaan säilyttää, mutta korjaukselta vaaditaan varmuutta. Julkisivun vaurioituminen olisi hyvä olla vähäistä, sillä korjauksen edellytyksenä on vanhan rakenteen riittävä lujuus. Paikkakorjaus on kustannuksiltaan kannattava, jos paikattavaa on vähän. Korjaustyön onnistuminen vaatii vauriokohtien perusteellista paikantamista, sillä paikkaamattomina vauriot lyhentävät merkittävästi korjauksen käyttöikää.

Keskeisimmät paikkakorjauksen materiaalit ovat eri vaiheiden laastit ja pinnoite. Korroosiosuoja-, tartunta- ja täyttölaastit ovat sementtipohjaisia, joihin on lisätty polymeerejä. Julkisivun toimivuus ja ulkonäkö saadaan aikaan oikaisulaastilla ja pinnoitteella. Julkisivun rasitustason mukaan pinnoitteeksi voidaan valita myös suojaava pinnoite, joka pienentää julkisivun kosteusrasitusta. Kuten pinnoitteet, myös korjauslaastit valitaan tapauskohtaisesti, ja laastien tulee olla niin sanotusti samasta tuoteperheestä. (Haukijärvi, 2005)

### 2.3.2 Eristerappaus

Eristerappaus on verhouskorjaus, jolla peitetään vanha julkisivu eristeellä ja rappauksella. Uusi rakenne kiinnitetään vanhaan julkisivuun, joten vanhalla rakenteella tulee olla riittävä lujuus. Ulkokuoren lisäkiinnitys sisäkuoreen voi tulla kyseeseen ja on varsin yleistä. Vanhan rakenteen vaurioita ei paikata, sillä ne jäävät uuden rakenteen alle, eivätkä vauriot enää etene merkittävästi.

Eristerappauksella muutetaan rakenteen rakennusfysikaalista toimintaa. Peittävä rakenne suojaa vanhaa rakennetta kosteusrasitukselta. Suositeltavaa on räystäiden jatkaminen ulkoseinän rakennepaksuuden kasvaessa. Vanha rakenne pääsee myös kuivumaan rakenteen lämpötilan noustessa. Lisälämmöneristäminen parantaa rakennuksen energiatehokkuuden lisäksi asumisviihtyisyyttä, sillä tiiviimmällä rakenteella vedon tunne sisätiloissa vähenee.

Eristerappaus on tuulettumaton verhouskorjaus. Uusi rakenne kuivuu ulkopinnan läpi, ja rakenteen kosteustekninen toimivuus vaatii vesihöyrynläpäisevien tuotteiden käyttöä. Sauma- ja liitoskohdat toteutetaan siten, että rappauskerrosten muodonmuutosliikkeet eivät synnytä vaurioita.

Eristerappausta tehdään kolmikerrosrappauksena ja ohutrappauksena. Tässä tutkimuksessa käsitellään ohutrappaus-eristejärjestelmää. Ohutrappauksessa on kaksi laastikerrosta, joista alimpaan painetaan lasikuituverkko. Lämmöneristeenä voidaan käyttää joko mineraalivillaa tai EPS-eristettä. Eristelevyt liimataan julkisivun pintaan ja kiinnityksen varmuutta parannetaan mekaanisin kiinnikkein. Pinnoitteina käytetään silikaatti-

silikoniharts-, keinoharts- tai sementtipinnoitteita, ellei käytetä pigmentoitua pintalaastia. Eristerappaus soveltuu kohteisiin, joiden julkisivujen vaurioituminen on edennyt pitkälle, mutta joiden rasisustaso on alhainen. (Haukijärvi, 2005)

### 2.3.3 Purkaminen ja uudelleenverhous

Purkaminen ja uudelleen verhous käsittää vanhan julkisivun ulkokuoren ja lämmöneristeiden purkamisen ja uuden rakenteen asentamisen. Purkaminen tulee usein kyseeseen, kun vaurioituminen on pitkälle edennyt ja julkisivun ulkokuoren lujuus on merkittävästi heikentynyt. Myös eristeiden kosteus- tai mikrobivauriot voivat olla syynä rakenteen purkuun. Rakenne voidaan uusida myös silloin, kun korjaukselta vaaditaan pitkää käyttöikää.

Jo itsessään lämmöneristeiden vaihto parantaa rakenteen energiatehokkuutta. Vanhat eristemateriaalit ovat nykymateriaaleja huonompia lämmöneristeitä. Lisäksi, mikäli eristeet ovat kastuneet tai vaurioituneet, niiden lämmöneristyskyky on heikentynyt. Usein ulkokuoren purun yhteydessä vanhat eristeet puretaan ja uusi eristepaksuus tehdään nykymääräykset täyttäväksi (U-arvon puolitus tai  $0,17 \text{ W/m}^2\text{K}$ ). Näin ollen rakennuksen energiatehokkuutta parannetaan. Suomessa lämmöneristeenä käytetään usein mineraalivillaa.

Uudelleenverhouksessa on eri vaihtoehtoja: eristerappaus, levyverhous, muuraus ja kuorielementit. Tässä tutkimuksessa käsitellään kuorielementtien tekoa. Kuorielementit ovat tuulettuva rakenne, joissa eristeen ja kuoren väliin päässyt kosteus poistuu tuuletusraon kautta. Kosteustekninen toimivuus edellyttää tuuletuksen, saumojen ja liitosten oikeaoppista toteutusta niin, että kosteus poistuu rakenteesta.

Kuorielementit voidaan kannattaa joko itsekantavina perustuksilta tai ripustettuna sisäkuoresta. Itsekantavinakin kuoret vaakatuetaan sisäkuoreen. Ripustettavat kuoret vaativat vanhalta rakenteelta lujuutta, kun taas omilta perustuksilta nousevat kuoret maaperän kantavuutta.

Julkisivun ulkonäköön voidaan vaikuttaa monin eri tavoin (sileä muottipinta, pe-subetoni, harjaus, hiekkapuhallus, maalaus, laatoitus yms.) Kuorielementeillä saadaan säilytettyä vanhan julkisivun ilme tai muutettua täysin uudennlaiseksi. (Haukijärvi, 2006)

## 2.4 Mallinnukset

Tässä tutkimuksessa kohderakennusten ympäristövaikutuksia arvioitiin energia- ja elinkaarisimuloinneilla. Energiamallin kalibrointiin on monia menetelmiä ja tässä tutkimuksessa mallin tarkkuutta optimoitiin vertaamalla simuloinnin tuloksia kohderakennusten energiankulutuksen kanssa. Elinkaariarviointi toteutettiin inventaario-analyysinä, joka rakennettiin standardien EN 14040 ja EN 14044 mukaan.

### 2.4.1 Energiamallinnus

Rakennuksen lämmitysenergiankulutus riippuu monesta tekijästä: rakennusmateriaaleista, rakennuksen geometriasta ja ympäristöolosuhteista kuten varjostuksesta. Näin ol-

len rakennusten lämmitysenergiankulutus ja korjauksilla saavutettavat säästöt ovat kohdekohtaisia. Siksi korjausratkaisujen energiansäästövaikutukset arvioidaan energiasimuloinnilla teknis-taloudellisen tarkastelun tueksi. (Mäkitalo & Hilliaho, 2013)

Energiamallinnus kalibroidaan käyttämällä kohteen toteutuneita lämmitysenergiankulutusarvoja. Kalibroinnissa pyritään yleisesti 5-10% tarkkuustasoon. Kalibroitaessa kohteista selvitetään kohteen sijainti ja ympäristöolosuhteet, rakennuksen käyttötarkoitus ja geometria, rakennetyypit ja -materiaalit.

Kalibroitaessa pyritään tarkentamaan niitä arvoja, joilla on tutkimuksen kannalta merkitystä. Toisin sanoen, kun tarkastellaan ulkoseinärakenteen korjauksen vaikutuksia rakennuksen energiankulutukseen ei ikkunoiden pikkutarkasta mallinnuksesta saada ulos vertailuhyötyjä. Kalibroimalla mallinnus aloitetaan suurista linjoista kuten sijainti tarkentaen rakennuksen geometriaa ja lopulta säätäen rakennuksen detajlien vaikutusta, kunnes toivottu tarkkuus saavutetaan. Kalibroinnin tuloksena saadaan nykytilanne- tai referenssimalli ennen korjauksia, joihin korjausratkaisujen energiankulutusta verrataan.

## 2.4.2 Elinkaariarviointi

Elinkaariarviointi (Life Cycle Assessment, LCA) on kehitetty tuotteiden ja palveluiden valmistuksen ja käytön ympäristövaikutusten arviointiin. Elinkaariarvioinnin yleiset ohjeet annetaan standardissa EN 14040 (Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2006) ja arvion tekemisen vaatimukset on kirjattu standardiin EN 14044 (Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2006). Standardien mukaan elinkaariarviointeja on kahden laisia: nelivaiheinen elinkaariarviointiselvitys (LCA-selvitys) ja kolmivaiheinen elinkaari-inventaarioselvitys (LCI-selvitys). Tässä tutkimuksessa käsitellään LCI-selvitystä.

LCI-selvityksen ensimmäinen vaihe on tavoitteiden määrittely. Elinkaariarviointi perustuu ajatukseen ”kehdosta hautaan”, joka rakennustekniikassa käsitetään usein rakennusmateriaalien tuottamisesta rakennuksen purkamiseen ja purkujätteen loppusijoitukseen. Kuitenkin jokaisen rakennushankkeen tavoitteet eli rajaukset tulee määrittellä kohdekohtaisesti. Selvityksen tasosta riippuen voidaan tarkastella esim. uudisrakennuksen rakentamisen päästöjä tai vertailla korjausvaihtojen elinkaari päästöjä.

Toinen vaihe on inventaariovaihe, jossa selvitetään arvioinnin syötteet. On selvitettävä tavoitteista riippuen käytettävät materiaalit, materiaalien kuljetukset, rakentamisen aikana käytettyjen ajoneuvojen kuluttama polttoainemäärä, rakennuksen energiankulutus jne. Aina ei haluta tutkia kaiken vaikutusta, kun taas joskus voidaan mennä hyvinkin yksityiskohtaiseen inventaarioon. Vaiheen tarkoituksena on kerätä se tieto, joka on tavoitteiden kannalta olennaista.

Viimeinen vaihe on tulkinta, jossa tavoitteiden kannalta tärkeimmät ympäristövaikutukset otetaan huomioon. Tässä tutkimuksessa tuloksia tulkitaan ilmastolämpenemispotentiaalin (Global Warming Potential, GWP) ja hiilidioksidiekvivalenttien (CO<sub>2</sub>-ekv.) avulla. GWP kuvaa atmosfääriin sidottua lämpö määrää, jonka kasvihuonekaasut aiheuttavat. CO<sub>2</sub>-ekv. kuvaa kasvihuonekaasujen yhteenlaskettua vaikutusta GWP:in. Kasvihuonekaasuilla on kerroin kuvaamaan kaasun päästöjen vaikutusta verrattuna hiilidioksidin vaikutuksiin. Esim. hiilidioksidin kerroin on 1 ja metaanin 21. CO<sub>2</sub>-ekv. ilmoitetaan



kiloina. Kasvihuonekaasu päästää lävitseen auringonsäteilyn, mutta sitoo lämpöenergian aiheuttaen kasvihuoneilmiön ja ilmaston lämpenemisen.

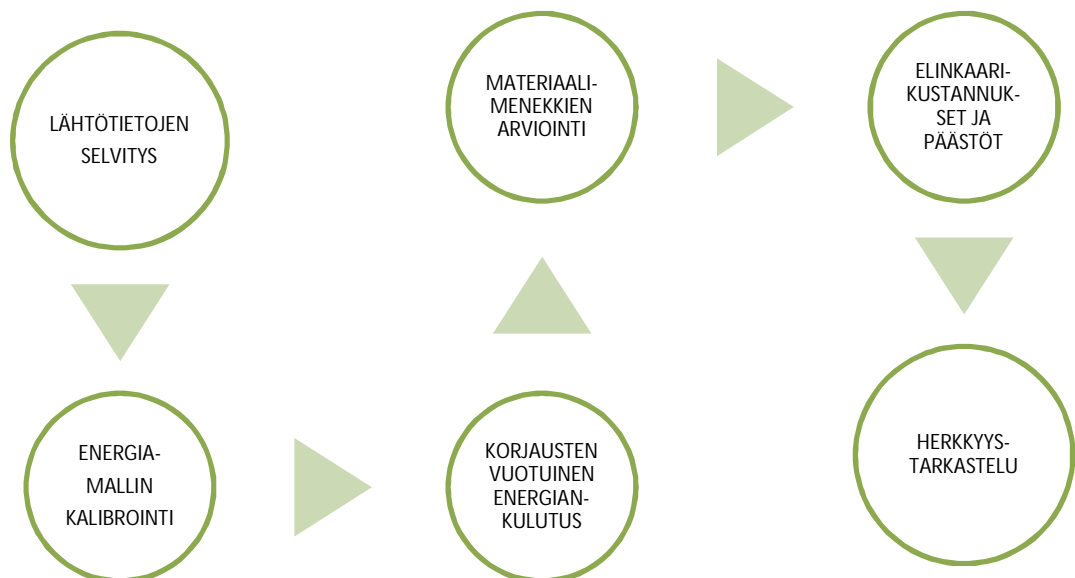
LCA:ssa tuotetta käsitellään tuotejärjestelminä. Tuotejärjestelmät koostuvat yksittäisistä prosesseista ja niiden virroista. Kun vertaillaan eri tuotejärjestelmien vaikutuksia, määritellään niin sanottu toiminallinen yksikkö (esim. kg/m<sup>2</sup>). Toiminnallinen yksikkö on kohdekohtainen vertailuyksikkö, jolla syötteiden määrä arvioidaan ja tulokset tulkitaan.

Tulosten luotettavuutta arvioidaan kolmivaiheisesti: täydellisyyden tarkastus, herkkyystarkastus ja johdonmukaisuuden tarkastus. Täydellisyyden tarkastuksella varmistetaan, että oleellinen tieto tulosten tulkintaan on saatavilla ja että nämä tiedot ovat riittäviä. Mikäli havaitaan, että tiedot ovat puutteelliset tai virheelliset, inventaariovaihe tulisi käydä läpi uudestaan tai tavoitteita muuttaa.

Herkkyystarkastus määrittää, miten epävarmuudet vaikuttavat tulosten heilahteluun. Herkkyystarkastelussa käydään läpi kaikki LCI-analyysin vaiheet ja tutkitaan mahdolliset epävarmuuden aiheuttajat. Näitä ovat mm. tavoitteiden määrittely, tutkimuksen rajaus, lähtötiedot ja inventaario. Olettamusten, menetelmien ja lähtötietojen yhtenevyyttä tavoitteiden ja soveltamisalan kanssa tutkitaan johdonmukaisuuden tarkastelussa. Tutkimukselle esitetään kysymyksiä, kuten ovatko lähtötietojen laatuerot johdonmukaisia tavoitteiden ja soveltamisalan kanssa. Lisäksi tutkimukselle voidaan tehdä tarvittaessa kriittinen arviointi, jonka suorittaa joku muu kuin alkuperäisen tutkimuksen tekijä.

### 3. AINEISTO JA TUTKIMUKSEN SUORITUS

Tässä luvussa esitellään tutkimuksen kohteiksi valikoituneet rakennukset ja tutkimuksen kulku. Ensiksi kohderakennuksista selvitettiin geometria ja rakenteet sekä energiankulutus. Seuraavassa vaiheessa energiamallit kalibroitiin kulutustiedon avulla riittävään tarkkuuteen. Rakennusten vuotuinen energiankulutus korjausten jälkeen simuloitiin molemmille rakennuksille, ja näistä saatiin lähtötiedot elinkaaripäästöjen määrittämiseen. Materiaalimenekit arvioitiin, ja näin pystyttiin laskemaan elinkaarikustannukset ja päästöt tarkastelujaksolla. Lopuksi mallinnusten herkkyyttä tutkittiin energian, päästöjen ja kustannusten kannalta. Tutkimusprosessi on esitetty kuvassa 3.1.



*Kuva 3.1 Tutkimusprosessin kulku*

#### 3.1 Kohteet

Tutkimuksen kohteiksi valikoitui yksi asuinkerrostalo ja yksi toimistorakennus Tampereelta. Asuinkerrostalo on valmistunut vuonna 1967. Se on nelikerroksinen, joista maantasokerros on sisäänvedetty ja kerroksessa on autotallit ja varastotilat. Muissa kerroksissa on asuinhuoneistoja. Julkisivut ovat pääosin pesubetonipintaiset ja ikkunoiden vierustoilla on käytetty tehosteena uritettua betonia. Julkisivuissa on erkkeitä ja ulkoseinära-kenteena on sandwich-tyyppinen betonielementti. Rakennuksessa on kaksi rappua. Huo-neistoparvekkeet sijaitsevat rakennuksen länsipuolella. (A-Insinöörit Suunnittelu Oy, 2015)

Toimistorakennus on valmistunut vuonna 1980 ja peruskorjattu 1992. Ra-kennuksen maantasokerros on sisäänvedetty ja kerroksessa toimii liikekiinteistöjä. Toi-misto sijaitsee kadun kulmassa, kahden rakennuksen välissä. Toimistorakennus jakautuu

kolmeen osaan, joista matalin osa on rakennuksen keskellä. Matala osa on kaksikerroksinen ja sen katolle on sijoitettu pyramidin muotoinen kattoikkuna. Itse toimistotilat sijaitsevat kolmikerroksisessa osassa. Lisäksi rakennuksessa on osa, jossa on neljä kerrosta. Nelikerroksisen osan katolla on pohjoiseen suuntaava kattoikkuna. Julkisivut ovat pääosin pesubetonipintaiset ja ulkoseinärakenne on betonisandwich. (Raksystems Anticimex, 2009)

Tässä tutkimuksessa molempien kohteiden julkisivujen pesubetonipinta jätettiin huomioimatta korjausstrategioiden paremman vertailtavuuden vuoksi. Kohteista oli käytävissä arkkitehti- ja rakennesuunnitelmat sekä julkisivujen kuntotutkimukset rakennuksen geometrian ja rakenteiden määrittämiseksi. Kerroskorkeus oli joko esitetty alkuperäisissä suunnitelmissa suoraan tai kerroskorkeus on mitattu suunnitelmista. Pinta-alat (kerros-, julkisivu- ja ikkunapinta-ala) on saatu tehdystä mallista.

Kohteista saatiin mitatut kaukolämmityksen energiankulutustiedot. Kaukolämmitystä käytetään rakennusten ja käyttöveden lämmittämiseen. Toimistorakennukselle ilmoitettiin rakennuksen lämpimän käyttöveden kuluttama energia kuukaudessa (6 MWh). Lämpimän käyttöveden vuosikulutus vähennettiin kaukolämmön kulutuksesta, ja näin saatiin toimistorakennuksen lämmittämiseen kulunut energia. Asuinkerrostalon lämmityksen osuudeksi arvioitiin 60% (Mäkitalo & Hilliaho, 2013). Kohteiden tiedot on esitetty taulukossa 3.1.

**Taulukko 3.1 Kohdetiedot**

Kohde	Kerroskorkeus	Kerros-pinta-ala	Julkisivujen pinta-ala	Ikkunoiden pinta-ala	Kaukolämmön-kulutus	Rakennuksen lämmitysenergia
	[m]	[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]	[MWh]	[MWh]
Asuinkerrostalo	2,35 (1.) 2,80 (muut)	2743	1200	430	432	260*
Toimistorakennus	4,8 (1. ja 2.) 3,3 (3. ja 4.)	5921	2200	700	600	528

\* Asuinkerrostalon lämmitykseen kuluva energia arvioitiin olevan 60% kokonaislämmitysenergiankulutuksesta

## 3.2 Energiamalli

Rakennusten energiankulutusta simulointiin IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE) -ohjelmalla (Equa simulation ab, 2017). IDA on dynaaminen laskentaohjelma, joka rakennuksen geometriaa ja sijainnin säätietoja käyttäen laskee rakennuksen lämpö- ja sähköenergian kulutuksen sekä sisäilmaston laadun. Laskentaa varten rakennuksen geometrian lisäksi IDA tarvitsee tiedot käytetyistä rakennusmateriaaleista ja niiden paksuuksista, toivotuista sisäilmasto-oloista (lämpötila yms.) ja ympäristöoloista (maantieteellinen si-

jainti, ympäröivien rakennusten varjostus yms.). IDA laskee energiankulutuksen ja sisäolosuhteet määrätyn aika-askeleen välein ja tuottaa tiedon rakennuksen lämpöenergian kulutuksesta simulointiin määritetyn ajan (vuosi) aikana.

Kohteista ei käytetty todellisia lämmityslaitteistoja, eikä lämpimän käyttöveden kulutusta tai taloussähköä otettu huomioon tarkasteluissa. Malleissa käytettiin ideaalista lämmitysjärjestelmää. Mallinnuksessa ei otettu huomioon sisäisiä lämmityskuormia (ihmiset, laitteet, valaistus), jolloin lämmityskautena saadaan kriittisin tulos. Laskenta tehtiin periodisena ja aika-askeleen mitta oli 1,5 tuntia. Simuloinnissa käytettiin säädettä HKi-Vantaa\_Ref\_2012. Asuinkerrostalolle käytettiin suojatun rakennuksen tuulenpaine kertoimia ja toimistorakennukselle osittain suojatun rakennuksen kertoimia.

Ulkoseinärakenteena käytettiin betonisandwich-rakennetta, jonka ulkokuoren ja eristeen materiaalityypit saatiin julkisivujen kuntotutkimusraporteista. Sisäkuoren paksuus on arvioitu arkkitehtipiirustuksista. Molemmille rakennuksille voitiin käyttää samaa ulkoseinärakennetta. Malleissa ulkoseinärakenne on sisältäpäin luettuna:

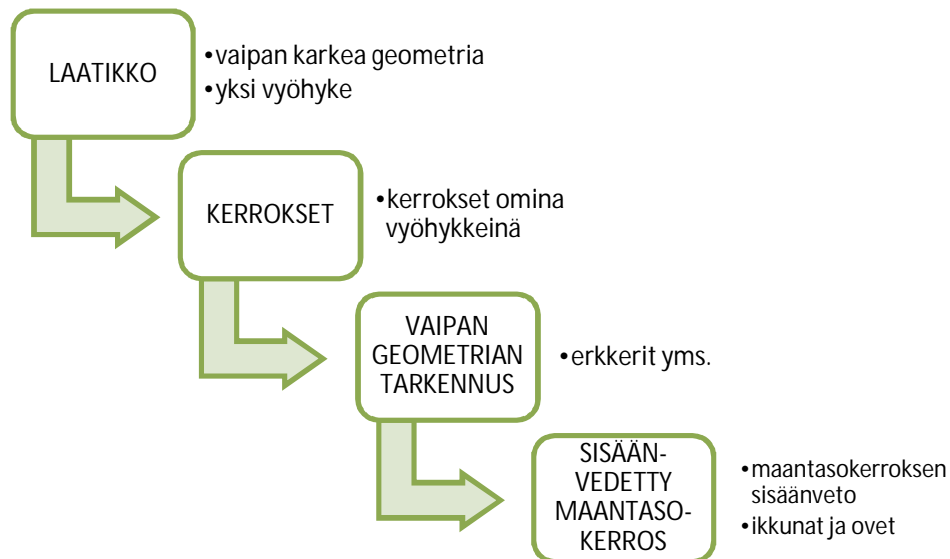
- 140 mm betoni
- 100 mm mineraalivilla (lämmönjohtavuus 0,045 W/mK)
- 80 mm betoni

Ikkunat toteutettiin kaksilasisina (Rakennusvalvonta Oulu, 2013), joiden lasien paksuus on 4 mm ja välissä on 12 mm ilmaa. IDA antoi näille ikkunoille U-arvon 2,9 W/m<sup>2</sup>K. Kaikki muut rakenteet kuin ulkoseinät ja ikkunat määräytyivät Suomen rakentamismääräyskokoelman D3 mukaan. Myös ihmisten lukumäärä neliötä kohti sekä laite- että valaistusteho neliölle säädettiin D3 mukaiseksi.

### 3.2.1 Mallin kalibrointi

Tutkimuksen yhtenä tavoitteena oli selvittää mallinnukseen käytetyn ajan ja mallin tarkkuuden suhde. Mallin rakentaminen vaatii henkilöresursseja. Mitä tehokkaammin malli voidaan rakentaa ja päästä siten riittävään tarkkuuteen, sitä taloudellisempaa se on palvelua tarjoavalle yritykselle. Tarkoituksena oli löytää se mallinnuksen ”raja-arvo”, jossa tulokset eivät enää merkittävästi muutu, mutta mallinnusaika pitenee. Malleissa pyrittiin saavuttamaan taulukossa 3.1 esitetyt rakennuksen lämmittämiseen käytetyt energiat 5-10% tarkkuudella. Näin ollen vaihteluväli on asuinkerrostalossa 234-286 MWh ja toimistorakennuksessa 475-581 MWh.

Mallin kalibroinnissa havaitaan myös lähtötietojen tarkkuuden vaikutus tuloksiin. Rakennusten geometria mallinnettiin ensin karkealla tasolla ns. laatikoksi, jossa otettiin huomioon vain rakennuksen vaippa ikkunoineen ja ovineen ilman erkkereitä tai sisäänvetoja. Myös kerrostasot jätettiin mallintamatta. Mallia tarkennettiin vaihe vaiheelta tuoden malliin julkisivujen monimuotoisuuden ja kerrostasot ja lopulta tilat. Periaatteellinen mallinnusprosessi on esitetty kuvassa 3.2.



**Kuva 3.2 Energiamallin tarkkuuden hakeminen**

Myös mallien rakentamiseen ja simulointiin käytettyä aikaa tutkittiin. Mallien tuloksia vertailtiin keskenään ja lopulliseksi malliksi valittiin se, jonka jälkeen tulokset eivät merkittävästi muuttuneet, mutta mallinnus- ja simulointiaika kasvoivat. Lopullista mallia käytettiin korjausstrategioiden elinkaaren energiankulutuksen vertailuun.

Mallien kalibrointi aloitettiin jättämällä mallintamatta erkkerit ja sisäänvedetty maantasokerros, joiden mallintamiseen kuluu paljon aikaa. Näin ollen pohjan ja julkisivujen pinta-ala erosi taulukon 3.1 arvoista. Ikkunoiden ja parvekeovien koot ja sijainnit mallinnettiin tarkasti.

### **Asuinkerrostalo**

Asuinkerrostalon laatikko-malli (kts. kuva 3.3) mallinnettiin yhtenä vyöhykkeenä ilman kerrostasoja. Ikkunat ja parvekeovet mallinnettiin niille paikoilleen, joissa ne ovat myös erkkereissä.



***Kuva 3.3 Laatikko-malli, jossa koko rakennus yhtenä vyöhykkeenä***

Seuraavassa vaiheessa laatikko-malli jaettiin kerroksiin. Näin ollen mallinnukseen tuli yhteensä neljä vyöhykettä, joista kolme ylintä olivat identtisiä korkeutensa suhteen, mutta alin oli muita matalampi. Muut lähtöarvot ja rakennuksen geometria pidettiin samana kuin laatikko-mallissa. Ns. kerros-malli on esitetty kuvassa 3.4.



***Kuva 3.4 Kerros-malli, jossa kerrokset vyöhykkeinä***

Asuinkerrostalon jokaisella julkisivulla on erkkereitä. Seuraavaan malliin pohjan pinta-ala ja julkisivut mallinnettiin erkkereiden kanssa. Ns. erkkeri-malli on esitetty kuvassa 3.5.



***Kuva 3.5 Erkkeri-malli, jossa kerrokset muodostavat omat vyöhykkeensä***

Seuraavassa mallissa huomiottiin asuinrakennuksen sisäänvedetty maantasokerros. Samalla otettiin huomioon maantasokerroksen ikkunat ja aukot. Ns. sisäänvedetty maantasokerros -malli on esitetty kuvassa 3.6.



***Kuva 3.6 Sisäänvedetty maantasokerros -malli***

Viimeisessä mallissa rakennuksen sisäpuoliset tilat jaettiin osiin: asutut tilat mallinnettiin erikseen muista tiloista (porrashuoneet). Porrashuoneiden vyöhykkeet erottuvat kuvasta 3.7 rakennuksen katolla olevista suorakulmioista.

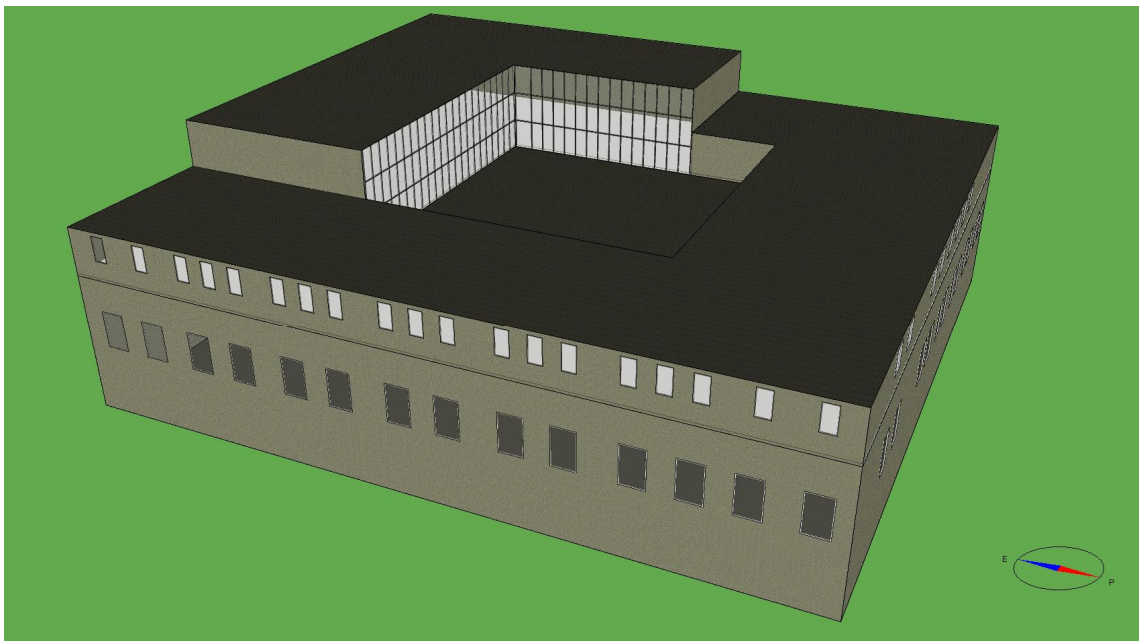




***Kuva 3.7 Tila-malli, jossa vyöhykkeitä yhteensä 31***

### **Toimistorakennus**

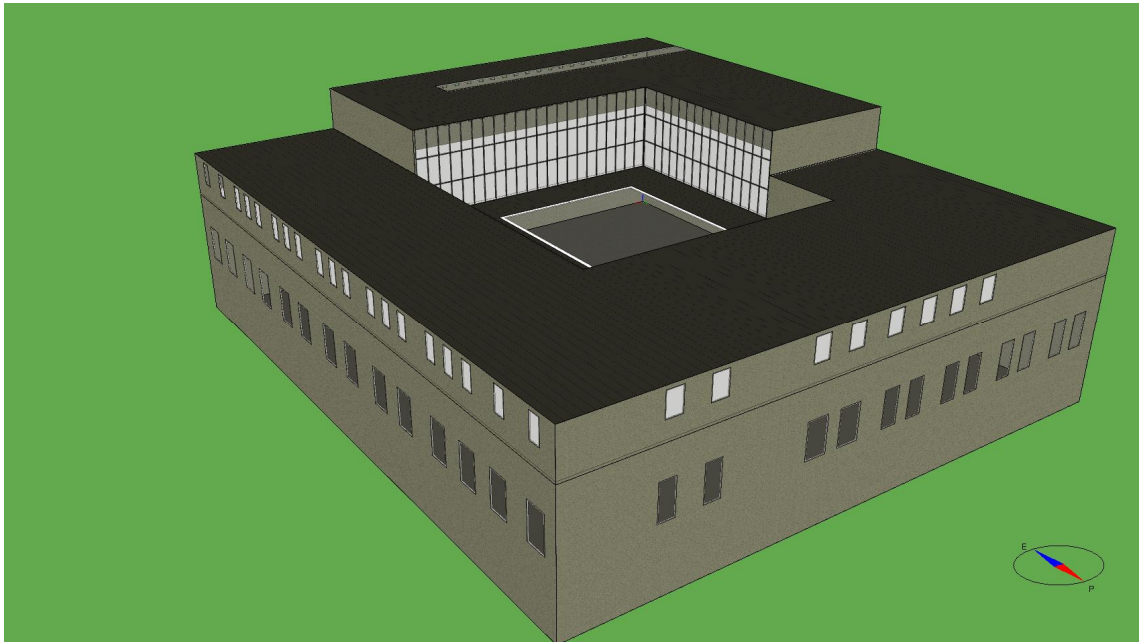
Toimistorakennuksen laatikko-malliin vyöhykkeitä tuli kolme: 1. ja 2. toinen kerros muodostavat yhden vyöhykkeen, vanhan osan 3. kerros yhden vyöhykkeen ja korkean osan 3. ja 4. kerros yhden vyöhykkeen. Eteläsivun kaksi ensimmäistä kerrosta mallinnettiin adiabaattisiksi (off set 18 °C). Toimistorakennuksen laatikko-malli on esitetty kuvassa 3.8.



***Kuva 3.8 Laatikko-malli, jossa kolme vyöhykettä***

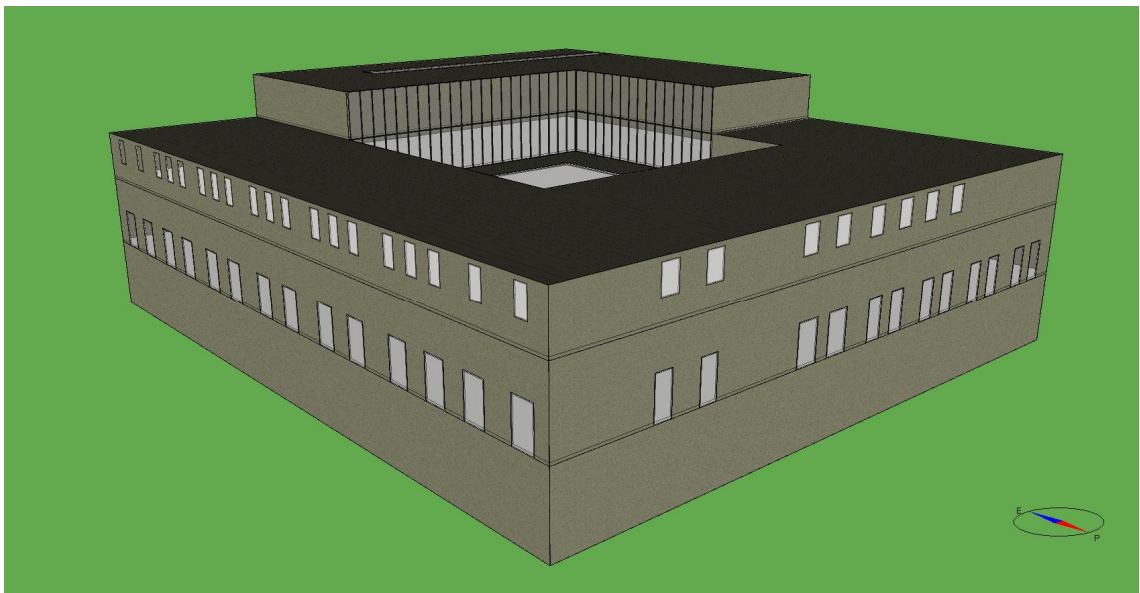
Seuraavassa mallissa tutkittiin kattoikkunoiden vaikutusta energiankulutukseen. Laatikko-malli kattoikkunoineen on esitetty kuvassa 3.9. Vyöhykejako pidettiin samana kuin edellisessä mallissa.





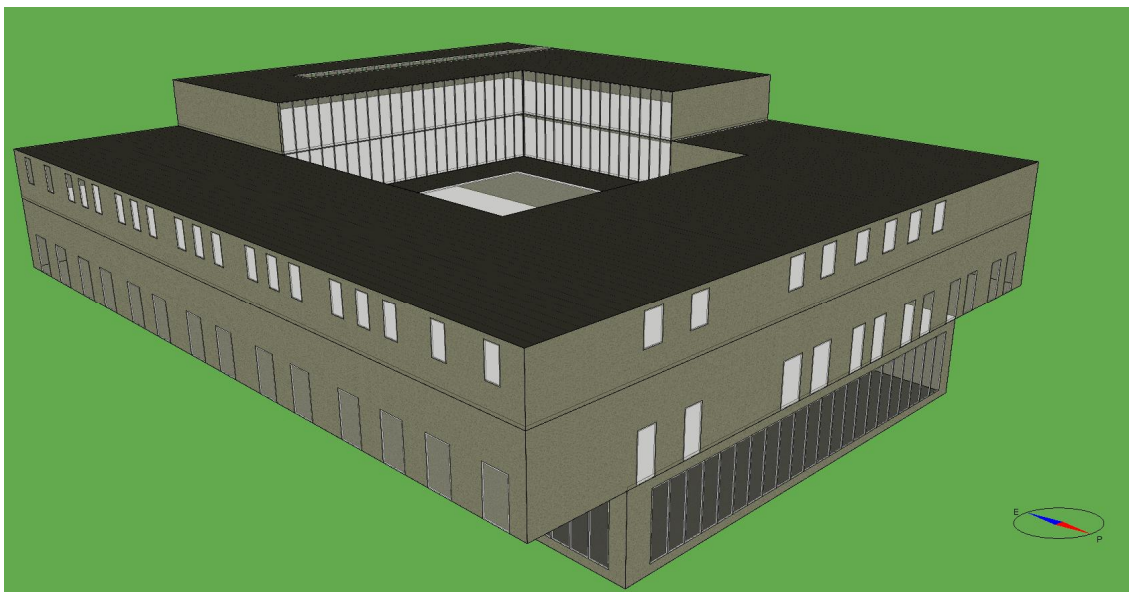
***Kuva 3.9 Laatikko-malli kattoikkunoineen***

Seuraavaan malliin loputkin kerrokset jaettiin omiksi vyöhykkeikseen. Yhteensä kerros-malliin (kts. kuva 3.10) tuli viisi vyöhykettä.



***Kuva 3.10 Kerros-malli, jossa viisi vyöhykettä***

Viimeisessä mallissa otettiin huomioon maantasokerroksen sisäänveto. Jokainen kerros muodostaa oman vyöhykkeensä. Sisäänvedetty maantasokerros-malli on esitetty kuvassa 3.11. Toimiston tilajako ei ollut selvillä kaikkien kerrosten osalta, joten tila-mallia ei tehty.



*Kuva 3.11 Sisäänvedetty maantasokerros-malli*

### 3.2.2 Korjausratkaisujen jälkeinen lämmitysenergiankulutus

Korjausratkaisujen energiankulutuksen vertailuun referenssimalleiksi valittiin julkisivujen kannalta pisimmälle viedyt mallit: sisäänvedetyt maantasokerrokset. Referenssimallien julkisivujen U-arvoiksi saatiin  $0,40 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

Ympäristöministeriön mukaan korjaushankkeissa täytyy valita yksi kolmesta vaihtoehdosta rakennuksen energiankulutuksen pienentämiseksi. Kuitenkaan korjaustoimenpiteiden ei tarvitse täyttää tätä vaatimusta, jos ne ovat teknis-taloudellisesti kannattamattomia. Paikkakorjaus ei vaikuta rakennuksen lämmitysenergiankulutukseen, sillä lämmöneristykselle ei tehdä mitään. Näin ollen paikkakorjatun rakennuksen lämmitysenergiankulutus on sama kuin referenssirakennuksen. Sen sijaan eristerappauksella sekä kuorielementin ja eristeiden vaihdolla on vaikutusta rakennuksen lämmitysenergiaan. Näiden rakennusten julkisivujen U-arvo pyrittiin pienentämään puoleen eli  $0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

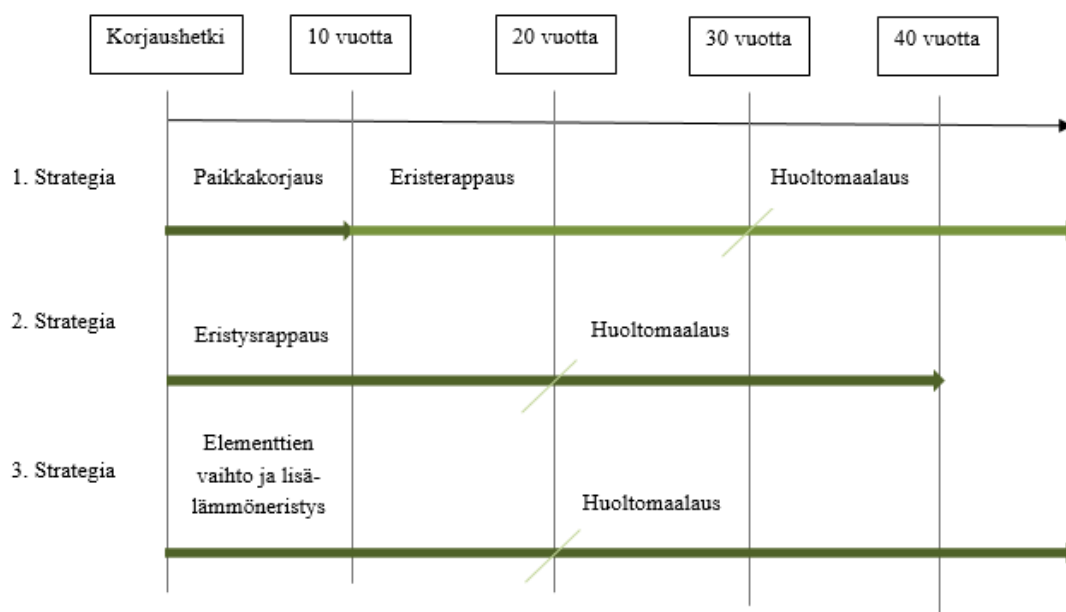
Eristerappauksessa vanha lämmöneriste jätettiin paikoilleen ja lisäksi asennettiin 90 mm mineraalivillaa ( $0,036 \text{ W/mK}$ ). Päälle tehtiin 13 mm rappaus. Eristerappauksen jälkeen ulkoseinän U-arvo oli  $0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Kuoren ja eristeiden vaihdossa uusittiin kaikki lämmöneristeet nykyaikaiseen mineraalivillaan ( $0,036 \text{ W/mK}$ ). Villaa laitettiin 170 mm ja ulkoseinän U-arvoksi saatiin  $0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Kaikissa tapauksissa ikkunat säilytettiin referenssimallin mukaisina. Taulukossa 3.2 on koottu korjausratkaisujen rakenteet ja niiden U-arvot.

**Taulukko 3.2 Käytetyt rakenteet**

	Referenssi	Paikkakorjaus	Eristerappaus	Elementtien vaihto
Rakenne	+ 140 mm betoni 100 mm eriste 80 mm betoni -	+ 140 mm betoni 100 mm eriste 80 mm betoni -	+ 140 mm betoni 100 mm eriste 80 mm betoni 90 mm eriste 13 mm rappaus -	+ 140 mm betoni 170 mm eriste 80 mm betoni -
U-arvo	0,40 W/m <sup>2</sup> K	0,40 W/m <sup>2</sup> K	0,20 W/m <sup>2</sup> K	0,20 W/m <sup>2</sup> K

### 3.3 Korjausstrategioiden elinkaaritarkastelu

Rakennusten elinkaarta tarkasteltiin 40 vuotta nykyhetken korjausten jälkeen. Korjausratkaisuista muodostettiin korjausstrategiat 40 vuoden käyttöiällä. Elinkaarissa huomioitiin korjausratkaisujen käyttöikä ja huoltojakso. Korjausstrategiat on esitetty kuvassa 3.12.

**Kuva 3.12 Korjausstrategioiden käyttöiät ja huoltojaksot**

Ensimmäisen korjausstrategiaan kuuluu paikkakorjaus ja myöhemmin tehtävä eristerappaus. Paikkakorjauksen käyttöikäksi arvioitiin kymmenen vuotta. Paikkakorjaukseen sisällytettiin laastipaikkausta 0,25 juoksumetriä yhtä julkisivuneliötä kohti. Ylitasoitus tehdään koko julkisivulle. Samalla uusitaan elementtisaumoja, joiden uusimistarve arvioitiin 75 cm per julkisivuneliö. Kymmenen vuoden jälkeen rakennukseen tehdään julkisivujen eristerappaus. Kun eristerappaus on ollut asennuttuna 20 vuotta, suoritetaan huoltomaalaus. 40 vuoden päästä nykyhetkestä julkisivulla on vielä kymmenen vuotta käyttöikää jäljellä.

Toinen korjausstrategia sisältää vain eristerappauksen. Eristerappaus vaatii 90 mm lisää eristettä ja rappauksen. 20 vuoden kohdalla julkisivut huoltomaalataan ja 40 vuoden jälkeen korjauksesta julkisivu on saavuttanut teknisen käyttöikänsä.

Kolmas korjausstrategia on kaikista järein. Elementtien vaihdossa oletettiin vanhat ulkokuoret ja eristeet purettaviksi. Tilalle asennetaan uudet lämmöneristeet 170 mm ja kuoret. 20 vuoden kohdalla julkisivut huoltomaalataan ja 40 vuoden jälkeen korjauksesta julkisivuilla on vielä kymmenen vuotta käyttöikää jäljellä.

### 3.3.1 Elinkaarikustannukset

Korjausratkaisujen investointikustannukset laskettiin Kustannuslaskuri-laskentaohjelmalla. Kustannuslaskuri on A-Insinöörien Excel-pohjainen laskentaohjelma, johon on kerätty korjaustoimenpiteitä ja niiden yksikköhintoja. Ohjelmasta valitaan korjaustoimenpide ja ohjelma ilmoittaa korjauksen yksikköhinnan. Seuraavaksi ohjelmaan syötetään korjauksen toimenpiteen laajuus ohjelman ilmoittamassa yksikössä (jm, m<sup>2</sup> jne.). Kustannuslaskuri huomioi korjauksiin kymmenen prosentin katteen ja arvonlisäveron 24%.

Tässä tutkimuksessa korjausten laajuutta ei syötetty ohjelmaan, koska tarkastelu tehtiin yhtä julkisivuneliötä kohti. Kustannuslaskurista haettiin vain toimenpiteiden hinta. Korjausratkaisuista käytetyt lähtöarvot on esitetty taulukossa 3.3. Menekit on arvioitu saman tyyppisissä korjauksissa käytettyjen menekkien mukaan. Jotta eri yksikköhintaisten toimenpiteiden kustannukset pystyttiin laskemaan yhdeksi investointikustannukseksi, menekit arvioitiin yhtä julkisivuneliötä kohti. Taulukon 3.3 arvoja sovellettiin molempiin kohderakennuksiin.

**Taulukko 3.3 Korjausratkaisujen hankintakustannusten lähtöarvot**

Korjausratkaisu	Korjaustoimenpide	Menekki	Yksikkö-hinta	Investointikustannus
		[julkisivu-m <sup>2</sup> ]		[€/julkisivu-m <sup>2</sup> ]
Paikkakorjaus	Suihkupuhdistus	1 m <sup>2</sup>	27 €/m <sup>2</sup>	143
	Laastipaikkaus	0,25 jm	82 €/jm	
	Ylitasoitus ja pinnoitus	1 m <sup>2</sup>	75 €/m <sup>2</sup>	
	Saumojen uusinta	0,75 jm	27 €/jm	
Eristerappaus	Lisälämmöneristämisen ja rappaus	1 m <sup>2</sup>	184 €/m <sup>2</sup>	217
	Räystään pidennys	0,2 jm	164 €/jm	
Elementtien vaihto ja lisälämmöneristämisen	Ulkokuoren purku	1 m <sup>2</sup>	89 €/m <sup>2</sup>	470
	Uusi eristys ja uusi kuori	1 m <sup>2</sup>	348 €/m <sup>2</sup>	
	Räystään pidennys	0,2 jm	164 €/jm	
Huoltomaalaus		1 m <sup>2</sup>	20 €/m <sup>2</sup>	20

Elinkaarikustannukset laskettiin käyttämällä JUKO-elinkaarilaskentaohjelmaa, joka on Excel-pohjainen laskentaohjelma. Ohjelman omistaa Julkisivuyhdistys ry. Ohjelma tarvitsee lähtötiedoikseen tarkastelujakson, laskentakoron, energianhinnan ja arvonlisäveron. Lisäksi ohjelmaan syötetään vaihtoehtoisten korjausratkaisujen hankintakustannukset julkisivuneliötä kohti ja korjauksen jälkeinen U-arvo. Ohjelmaan syötetään myös korjausten ajankohta ja mahdollinen julkisivukorjauksen jäännösarvo. Tuloksena ohjelma antaa valitun tarkastelujakson investointi-, kunnossapito- ja energiakustannukset sekä näistä yhteenlasketun elinkaarikustannuksen.

Laskennan tarkoituksena on tuoda tulevaisuudessakin tehtävät investoinnit nykyarvoon vertailukelpoisiksi. Laskennassa investoinnit ja tuotot diskontautuvat laskentakoron avulla sitä pienempinä mitä myöhemmin ne tapahtuvat. Näin kahden saman suuruisen suorituksen nykyarvo on eri, jos ne tapahtuvat eri aikaan. Rakennuksen pitoaika kuvastaa omistajan tahtoa rakennuksen säilyttämiseen. Se voi kuvata myös käyttötarkoituksen tai muun vastaavan isomman muutoksen ajankohtaa. Energianhinta taas kuvaa voimassa olevia olosuhteita. Tässä tutkimuksessa JUKO-laskennassa tarkastelujaksona käytettiin 40 vuotta, laskentakorkona 2%:n reaalikorkokantaa, energianhinta 0,08 €/kWh ja arvonlisävero 24%.

Korjausratkaisujen investointikustannuksena käytettiin taulukossa 3.3 esitettyjä hintoja. Korjausratkaisujen U-arvoina käytettiin taulukossa 3.2 esitettyjä arvoja. Ensimmäisen korjausstrategian eristerappauksen jäännösarvoksi arvioitiin neljännes investointikustannuksesta eli 54 €/julkisivu-m<sup>2</sup> ja korjausstrategialle 3 elementtien vaihdon jäännösarvoksi viidennes investoinnista eli 94 €/julkisivu-m<sup>2</sup>.

### 3.3.2 Elinkaaripäästöt

Korjauksen ja sen jälkeisiä kasvihuonepäästöjä tutkittiin Gabi-ohjelmalla. Gabi on elinkaarilaskentaohjelma (Life Cycle Assessment, LCA), jonka lähtötietoina käytetään materiaalien kiloina ja rakennuksen energiankulutusta sekä energian hankintamuotoa, ja ohjelma laskee, kuinka paljon kasvihuonepäästöjä tuotetaan tarkastelujakson aikana.

Kasvihuonepäästöjä tutkittiin ilmastomuutospotentiaalia (Global Warming Potential, GWP) hiilidioksidiekvivalentteina. Tarkastelussa otettiin huomioon materiaalien valmistuksesta aiheutuvat päästöt. Lämmitysenergian tuotanto oletettiin tapahtuvan kaukolämmityslaitoksissa biomassalla. Tarkastelussa ei huomioitu kuljetusten aiheuttamia päästöjä tai korjausten aikana kulutettua energiaa.

Tarkastelu tehtiin julkisivuneliötä kohti molemmille kohteille ja jokaiselle korjausratkaisulle erikseen. Rakennuksen energiankulutus saatiin energiasimulaation perusteella ja energiankulutuksesta huomioitiin vain vaipan ja kylmäsiltojen kautta kulutettu energia. Lämpöhäviöt rakennuksen vaipan kautta 40 vuoden tarkastelujakson aikana korjausratkaisuille kohdekohtaisesti on esitetty taulukossa 3.4. Strategian 1 lämpöhäviö koostuu kahdesta osasta: ensimmäinen osa syntyy paikkakorjauksen 10 vuoden käyttöiän aikana ja toinen osa eristerappauksen 30 vuoden jakson aikana. Muille korjausratkaisuille energiankulutus on sama koko tarkastelujakson ajan.

**Taulukko 3.4 Korjausstrategioiden energiankulutukset julkisivuneliötä kohti 40 vuoden aikana**

Korjausstrategia	Energiankulutus julkisivuneliötä kohti			
	Asuinkerrostalo		Toimistorakennus	
	kWh	MJ	kWh	MJ
1 (paikkakorjaus ja eristerappaus)	1 090+2 400	3 920+8 640	1 750+3 900	6 300+14 000
2 (eristerappaus)	3 200	11 500	5 200	18 700
3 (elementtien vaihto)	3 200	11 500	5 200	18 700

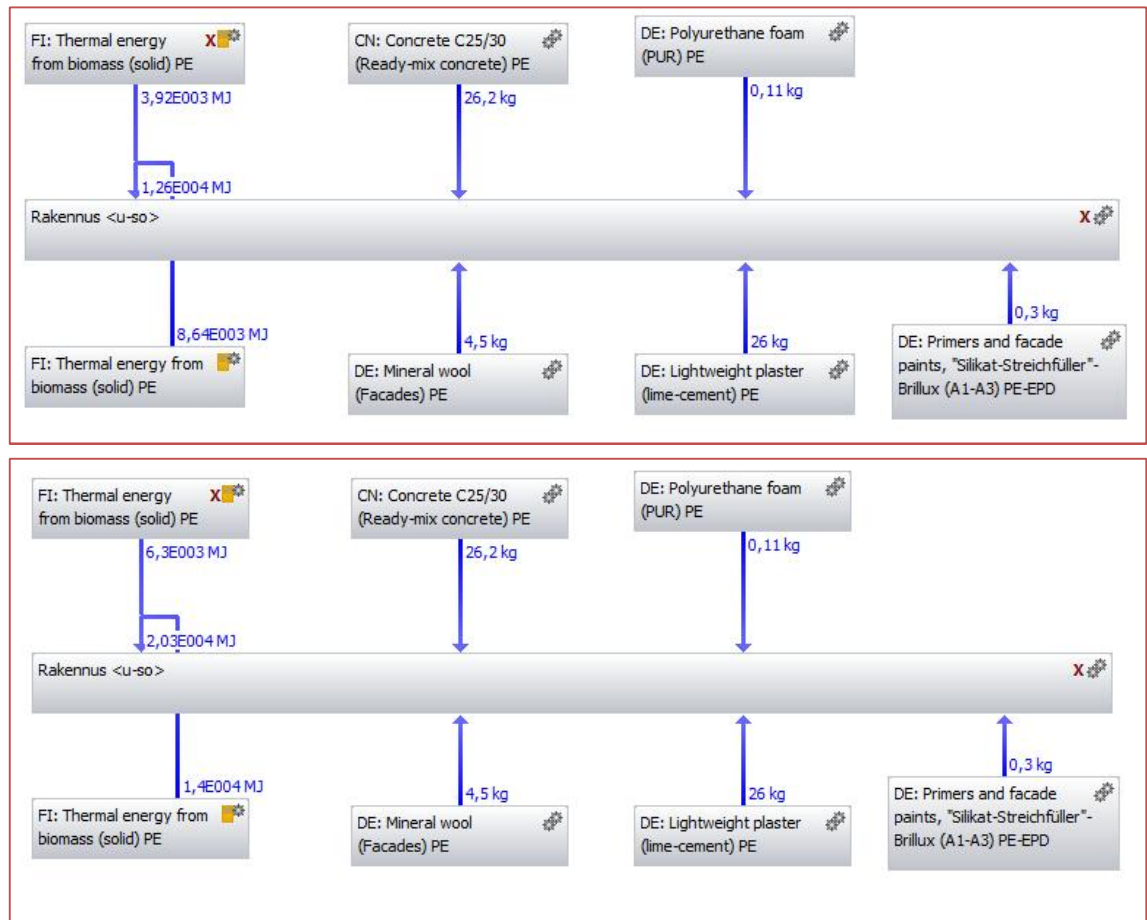
Rakennusmateriaalien menekki laskettiin taulukon 3.3 menekkien ja materiaalien tiheyksien avulla. Betonin tiheydeksi arvioitiin 2500 kg/m<sup>3</sup>, mineraalivillan 50 kg/m<sup>3</sup> ja rappauslaastin 2000 kg/m<sup>3</sup>. Laastipaikkausta ajateltiin 50 mm teräksen ympärille ja ylitasoitusta 10 mm. Elementtisaumojen paksuuden ja leveyden arvioitiin olevan 15 mm ja 7 mm. Saumamassan tiheytenä pidettiin 1,35 kg/l (Sika, 2014). Uudet kuorielementit ajateltiin saman paksuisiksi kuin edellisetkin eli 80 mm. Rappauskerros ajateltiin 13 mm:n paksuksi. Maalin menekiksi arvioitiin 0,3 kg julkisivuneliötä kohti. Näin saatiin materiaalien menekit kiloina, jotka on esitetty taulukossa 3.5 korjausratkaisu kohtaisesti.

**Taulukko 3.5 Käytetyt menekit LCI-malleissa**

	Strategia 1	Strategia 2	Strategia 3
	kg/julkisivu-m <sup>2</sup>		
Betoni	1,23 + 25	-	200
Elementtisauma	0,11	-	-
Mineraalivilla	4,5	4,5	8,5
Rappauslaasti	26	26	-
Maali	0,3	0,3	0,3

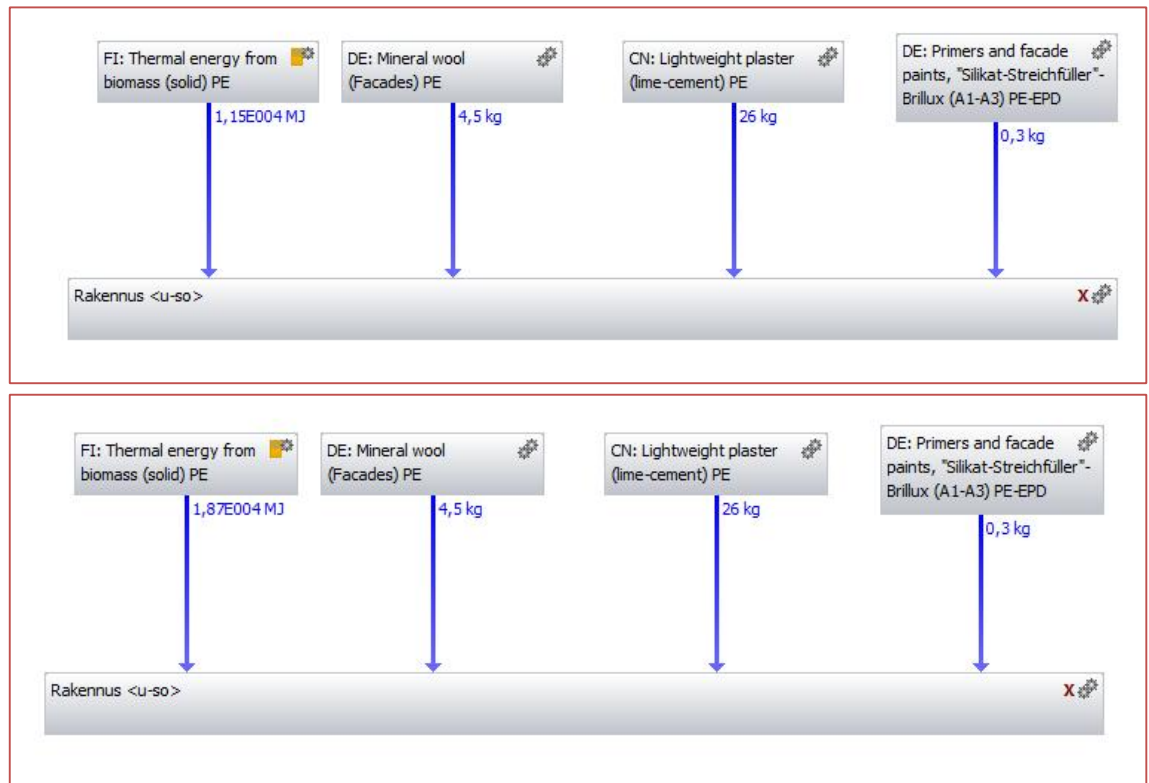
Rakennusten LCI-mallit on esitetty kuvissa 3.13-3.15. Malleissa on esitetty materiaalien ja energianlähteen lähtötiedot. Asuinkerrostalo ja toimistorakennus ovat materiaalimenekiltään samat, koska tarkastelu tehtiin julkisivuneliötä kohti. Kohteiden energiankulutustietona on käytetty taulukossa 3.4 annettuja arvoja megajouleina.

Strategian 1 mallinnuskuvassa paikkakorjauksen materiaalit ja energiankulutus kymmenen vuoden aikana on kuvattu ylhäältä rakennukseen. Eristerappauksen materiaalit ja energiankulutus 30 vuoden aikana on kuvattu alhaalta päin. Laastipaikkauksiin ja ylitasoituksiin käytettiin betonia C25/30. Elementtisaumauksiin sovellettiin polyuretaanivaahtoa, joka oli materiaalikirjastossa lähinnä elementtisaumamassaa. Mineraalivillalle oli käytössä monia vaihtoehtoja, ja niistä valittiin julkisivuihin tarkoitettu eriste. Rappauslaastina käytettiin kalkki-sementtilaastia ja maalina julkisivuille tarkoitettua silikaattimaalia.



**Kuva 3.13 Strategia 1, LCI-malli asuinkerrostalo (yllä) ja toimistorakennus**

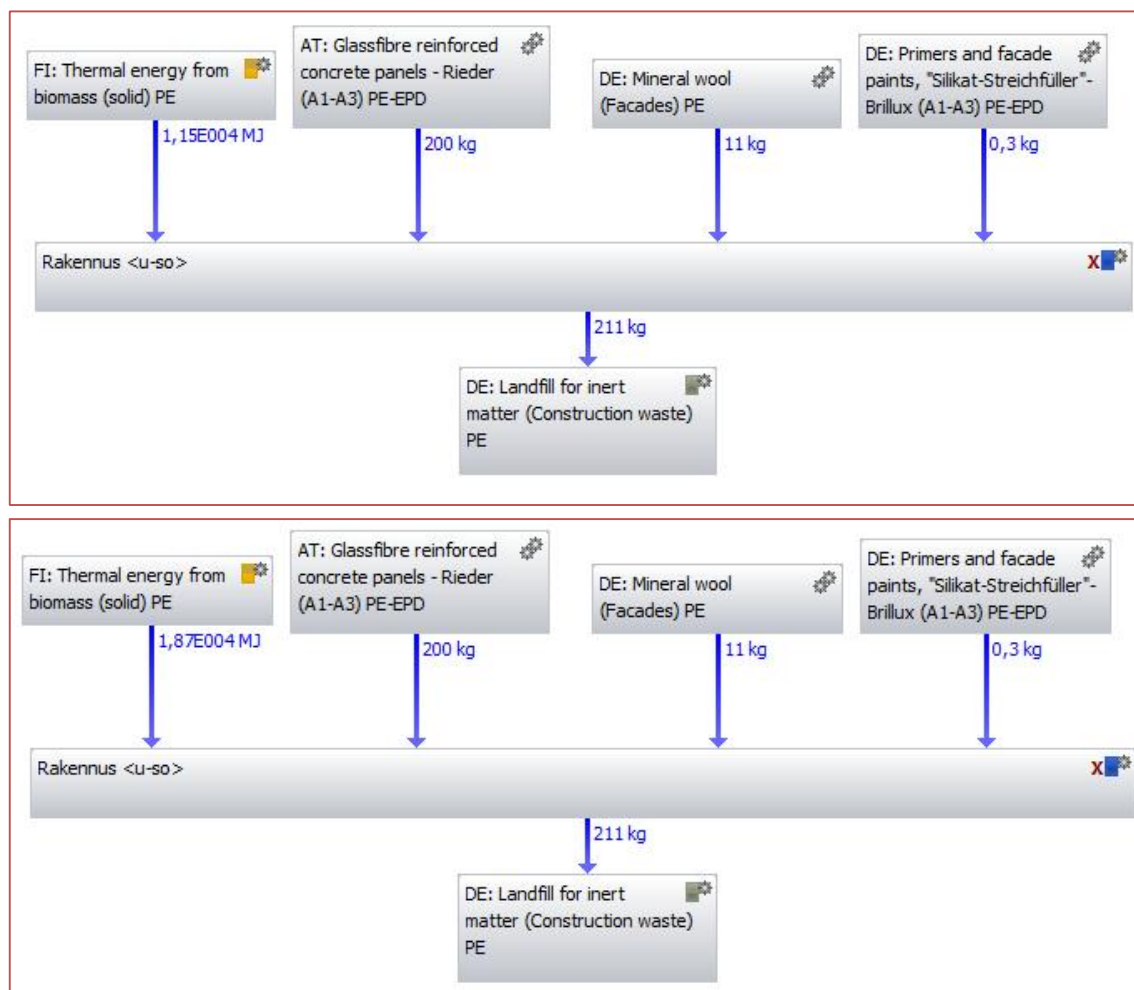
Strategia 2 käsittää rakennuksen eristerappauksen, jonka käyttöikä on 40 vuotta. Mallissa käytettiin samoja materiaaleja kuin strategiassa 1. Mallissa ei huomioitu eristerappauksen purkua 40 vuoden päästä.



**Kuva 3.14 Strategia 2, LCI-malli asuinkerrostalo (yllä) ja toimistorakennus**

Strategiassa 3 rakennuksen kuorielementit puretaan ja eristeet vaihdetaan. Purkujäte si-  
joitettiin maatäytöksi. Uusien elementtien käyttöikä arvioitiin olevan 50 vuotta, mutta tu-  
lostien vertailemiseksi energiankulutus laskettiin 40 vuodelle. Betonina käytettiin te-  
räskuitubetonia, sillä kirjastosta ei löytynyt teräsbetonille omaa materiaalia. Mineraali-  
villa ja maali ovat samoja materiaaleja kuin aiemmissakin malleissa.





Kuva 3.15 Strategia 3, LCI-malli asuinkerrostalo (yllä) ja toimistorakennus

### 3.4 Herkkyystarkastelu

#### 3.4.1 Energiamalli

Energiamallin herkkyystarkastelu tehtiin asuinkerrostalon referenssimallille ja tarkastelu jaettiin kolmeen osaan: ohjelman tarkkuuteen, mallinnustapaan ja lähtötietojen tarkasteluun. Ohjelman tarkkuutta testattiin muuttamalla periodinen simulointi dynaamiseksi ja lyhentämällä aika-askeleen pituutta. Mallinnustapaa testattiin muuttamalla painekertoi-mia osittain suojatusta täysin suojattuun ja täysin suojamattomaan. Lähtötietojen merkitystä on tutkittu kohdassa 3.2.1 Mallin kalibrointi.

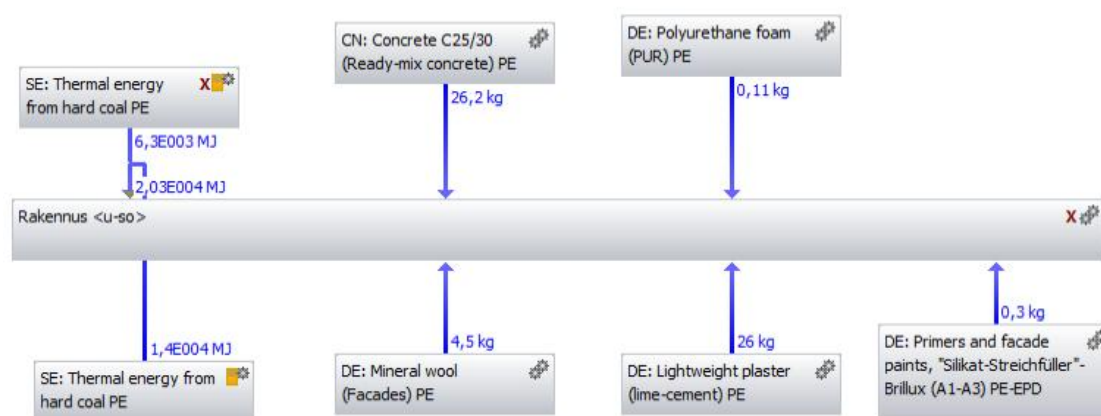
#### 3.4.2 Kustannukset

Kustannusten herkkyystarkastelu tehtiin asuinkerrostalolle. Tarkastelu suoritettiin vaihtamalla tarkastelujakson pituutta, muuttamalla laskentakorkoa ja kasvattamalla energianhintaa. Taloudellista pitoaika lyhennettiin 20 vuoteen, laskentakorko vaihdettiin viiteen prosenttiin ja energianhinta tuplattiin ja triplattiin. Jokaista muutosta kokeiltiin yksinään

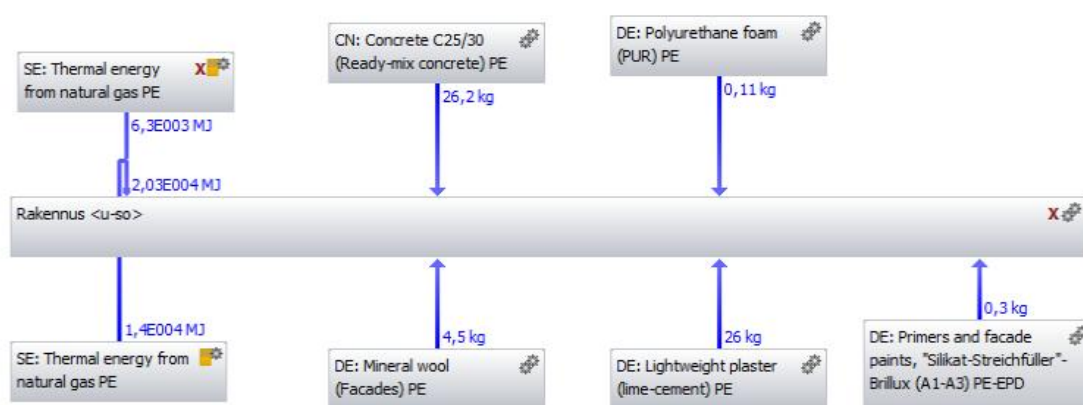
ja yhdessä muiden muutosten kanssa. 20 vuoden pitoajalla paikkakorjauksen huoltomaalausta ei otettu huomioon ja kaikilla korjausratkaisuilla oli vielä käyttöikää jäljellä. Strategiasta 1 jäi arvoa 163 €, strategiasta 2 jäi 108 € ja strategiasta 3 jäi 282 €

### 3.4.3 Päästöt

Suomessa kaukolämmön tuotannossa pääasialliset materiaalit ovat biomassan lisäksi kivihiili ja maakaasu. Koska tutkimuksessa ei voitu varmistaa kohderakennusten kaukolämmön tuotannossa käytettyä polttoainetta, herkkyystarkastelussa tutkittiin kivihiilen ja maakaasun vaikutusta energiankulutuksen aiheuttamiin päästöihin. Herkkyystarkastelu tehtiin toimistorakennukselle, sillä sen energiankulutus on suurempi julkisivuneliötä kohti. Kuvissa 3.16 ja 3.17 on esitetty herkkyystarkastelun mallit strategialle 1 kivihiilelle ja maakaasulle. Aiempaan tarkasteluun nähden ei ole muutettu muuta kuin energian tuotannon raaka-ainetta.



**Kuva 3.16 Energian tuotannon raaka-aineena kivihiili**



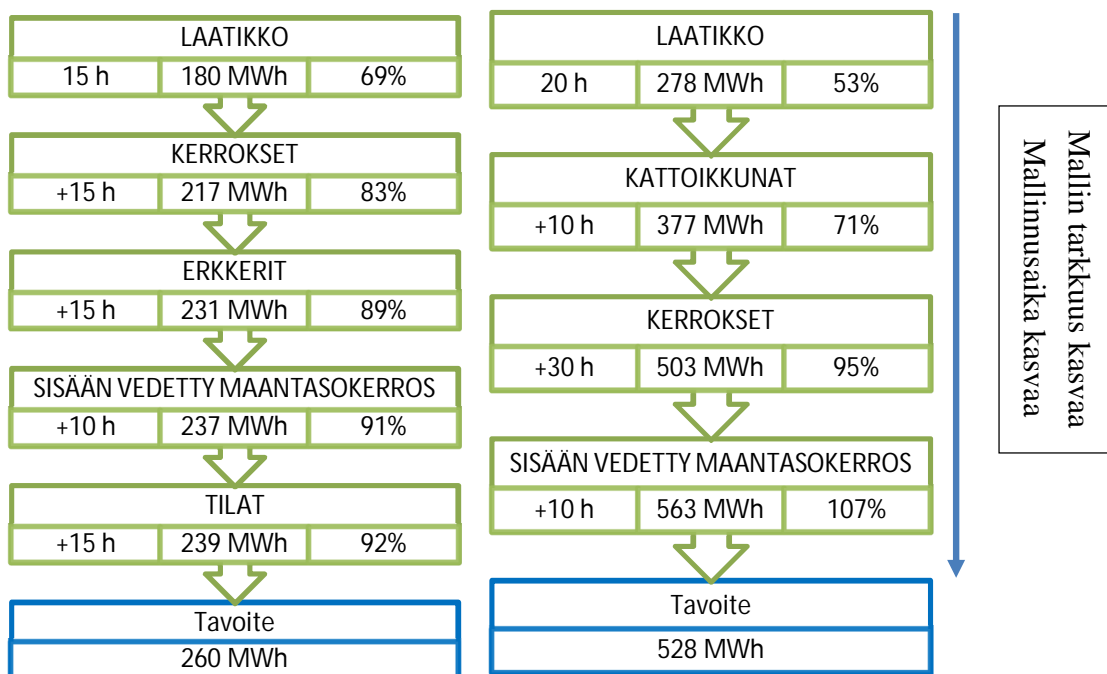
**Kuva 3.17 Energian tuotannon raaka-aineena maakaasu**

## 4. TULOKSET

Tässä luvussa esitetään mallinnusten tulokset tutkimuksen kronologisessa järjestyksessä. Luvut 4.1 ja 4.2 käsittelevät energiamallinnuksen tuloksia, luku 4.3 elinkaarikustannuksia ja 4.4 elinkaaripäästöjä. Luvussa 4.5 on esitetty tutkimuksen herkkyyštarkastelu.

### 4.1 Energiamallin kalibrointi

Kuvassa 4.1 on esitetty rakennusten vuosittaiset lämmitysenergiankulutukset, jotka saatiin IDA-ohjelmalla eri tasoisia mallinnuksia käyttäen. Malleja tarkennettaessa uusi malli rakennettiin edellisen mallin pohjalta, jolloin tarkemman mallin tekemiseen käytetty aika on esitetty lisätunteina edelliseen malliin nähden.



**Kuva 4.1 Asuinkerrostalon (vas.) ja toimistorakennuksen energiamallien kalibrointien tulokset**

Julkisivujen karkealla mallinnuksella (laatikko-malli) ei saavuteta tavoiteltua tarkkuutta. Asuinkerrostalossa jäädyään alle 70%:n ja toimistorakennuksessa saavutetaan vain hieman yli puolet tavoitteesta. Rakennuksen kerrokseen jakamisella vaikuttaisi olevan suuri merkitys simuloinnin tulokseen. Asuinkerrostalossa tarkkuus paranee 14%-yksikköä ja toimistorakennuksessa 24%-yksikköä edelliseen malliin nähden. Ulkovaipan pinta-alan kasvattaminen kasvattaa kokonaisenergiankulutusta, mutta merkitys tarkkuuteen on pienempi. Sisäänvedetyn maantasokerroksen malleilla pysytään tavoitellussa tarkkuudessa.

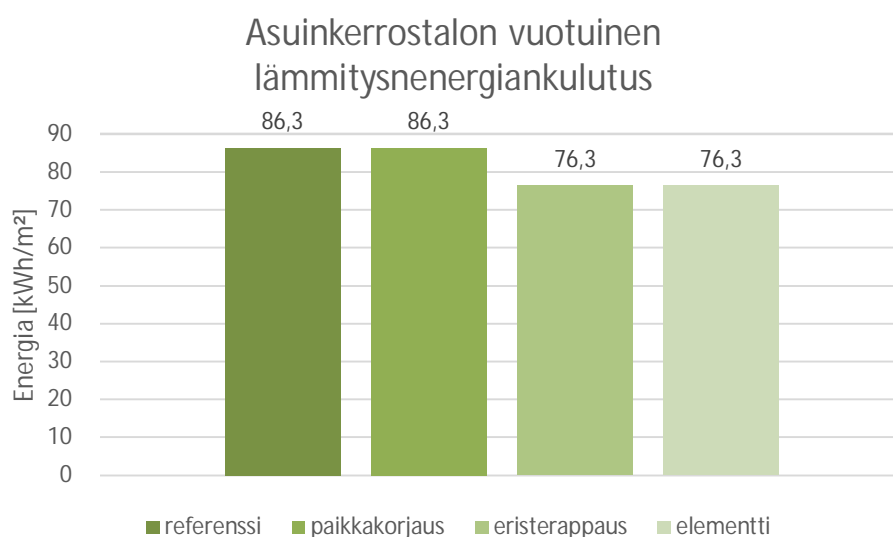
Asuinkerrostalon jakaminen tiloihin ei paranna merkittävästi mallinnuksen tarkkuutta, ja koska riittävä tarkkuus oli jo saavutettu, ei mallinnusta olisi tarpeellista tehdä

julkisivutarkastelussa. Toimistorakennuksessa riittävä tarkkuus saavutettiin kerrokseen ja-olla ja sisäänvedetty maantasokerros heikentää mallin tarkkuutta. Kuitenkin julkisivutarkastelun kannalta on mielenkiintoista ottaa seuraavien tarkastelujen referenssimalliksi molemmille kohteille sisäänvedettyjen maantasokerrosten mallit.

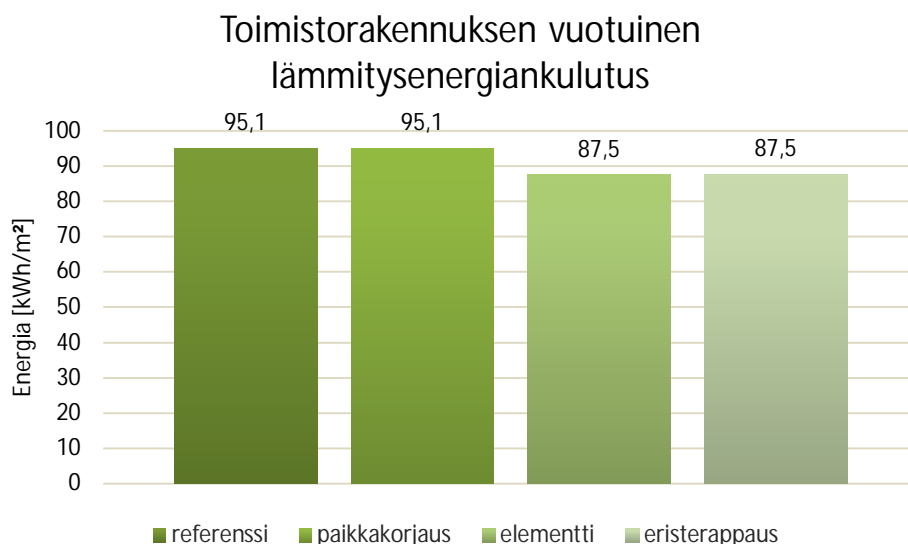
Mallien tarkennus oltaisiin voitu tehdä myös julkisivutarkastelun kannalta mielekkäämmässä järjestyksessä. Rakennuksen vaippa olisi tarkennettu ensin täysin valmiiksi ennen rakennuksen kerrokseen jakoa. Kerrokseen jako oltaisiin tehty siis vasta sisäänvedetyn maantasokerroksen jälkeen. Näin oltaisiin voitu saavuttaa haluttu tarkkuus aiemmin ja mallinnusaikaa olisi säästynyt. Tosin tällöinkin malli jakautuu kahteen vyöhykkeeseen mallinnusteknisistä syistä (maantasokerros ja muut).

## 4.2 Korjausratkaisujen lämmitysenergiankulutus

IDA-ohjelmalla saadut vuotuiset lämmitysenergiankulutukset kerrosneliötä kohti eritasoisilla nykyhetken korjausratkaisuille verrattuna referenssimallin vuotuisen lämmitysenergiankulutukseen on esitetty kuvissa 4.2 ja 4.3.



**Kuva 4.2 Asuinkerrostalon vuotuinen lämmitysenergiankulutus nykyhetken korjauksen jälkeen verrattuna tilanteeseen ennen korjausta**



**Kuva 4.3 Toimistorakennuksen vuotuinen lämmitysenergiankulutus nykyhetken korjauksen jälkeen verrattuna tilanteeseen ennen korjausta**

Asuinkerrostalossa eristerappauksen tai kuorielementtien asennuksen yhteydessä toteutettavalla lisälämmöneristämällä on noin 12 prosentin vaikutus lämmitysenergiankulutukseen, toimistorakennuksessa yhdeksän prosenttia. Molemmissa rakennuksissa elementin vaihtamisella ja eristerappauksella ei ole merkittävää eroa lämmitysenergiankulutuksessa, koska eristepaksuudet valittiin siten, että julkisivujen U-arvot ovat lähes samat. Paikkakorjaamalla ei voida parantaa rakennusten energiatehokkuutta.

### 4.3 Elinkaarikustannukset

Eriasteisten korjausstrategioiden elinkaarikustannukset on esitetty kuvassa 4.4. Laskenta-aikana käytettiin 40 vuotta, laskentakorkokantaa 2% ja energianhintana 8 snt/kWh. Strategian 1 investointikustannus koostuu paikkakorjauksen investoinnista ja eristerappauksen jäännösarvosta. Kunnossapitokustannukset koostuvat eristerappauksen ja huoltomaalauksen investointikustannuksesta. Energiakustannukset muodostuvat sekä paikkakorjatun että eristerapatun seinän U-arvon ja energianhinnan mukaan 40 vuoden aikana.

Strategian 2 investointikustannus on eristerappauksen investointikustannus. Strategian 3 investointikustannus koostuu elementtien vaihdon investointikustannuksesta ja sen jäännösarvosta. Strategioiden 2 ja 3 kunnossapitokustannus on huoltomaalauksen investointikustannus ja energiakustannus muodostuu 40 vuoden aikana.



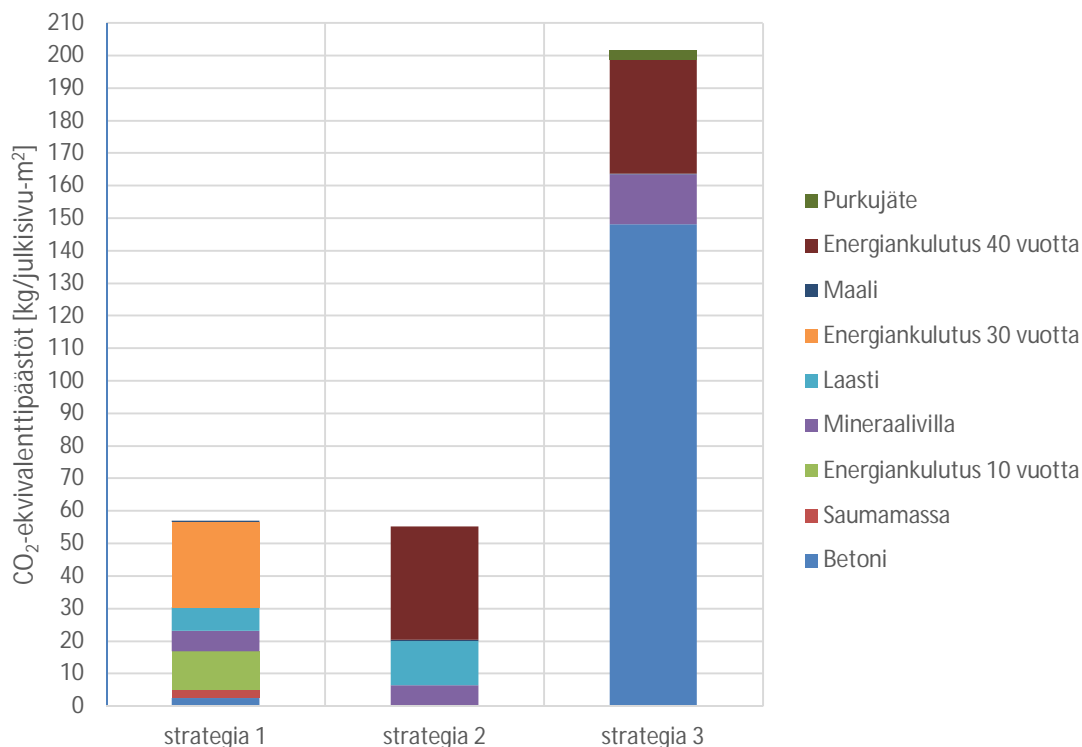
**Kuva 4.4 Korjausratkaisujen elinkaarikustannukset 40 vuoden aikana**

Elinkaarikustannuksiltaan edullisin vaihtoehto on korjausstrategia 2, joka sisältää julkisivujen eristerappauksen ja huoltomaalauksen 20 vuoden kuluttua. Strategian 1, paikkakorjaus ja eristerappaus, investointikustannus on edullisin, mutta kunnossapitokustannuksessa huomioitu eristerappaus nostaa strategian elinkaarikustannuksia. Strategia 1 on elinkaarikustannuksiltaan 71%:a kalliimpi kuin strategia 2. Ulkokuoret uusiva strategia 3 ei ole edullisempi kuin muut missään kustannusluokassa ja on elinkaarikustannuksiltaan 78%:a kalliimpi kuin strategia 2. Strategian 1 ja 3 kustannusero on noin 4%.

#### 4.4 Elinkaaripäästöt

Korjausstrategioiden elinkaaripäästöt hiiliekvivalenttina (CO<sub>2</sub>-ekv.) molemmille rakennuksille on esitetty kuvissa 4.5 ja 4.6.

### Asuinkerrostalon korjausstrategioiden CO<sub>2</sub>-ekvivalenttipäästöt 40 vuoden aikana



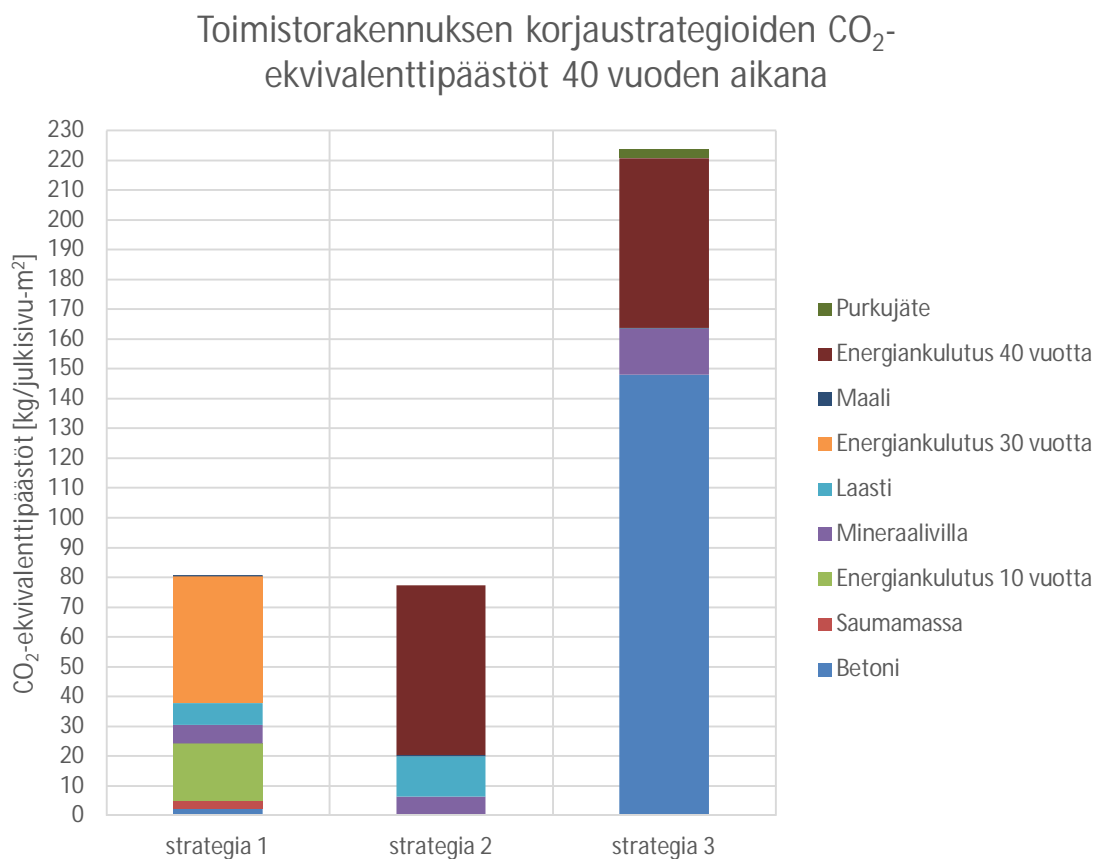
**Kuva 4.5 Asuinkerrostalon korjausstrategioiden kasvihuonekaasupäästöt hiilidioksidiekvivalentteina julkisivuneliötä kohti 40 vuoden aikana**

Asuinkerrostalon strategian 1, paikkakorjaus ja eristerappaus, päästöt yhteensä koko tarkastelujakson aikana ovat noin 57 kg hiilidioksidiekvivalenttia. Suurin vaikutus strategian 1 elinkaaripäästöihin on viimeisen kolmenkymmenen vuoden energiankulutuksella. Energiankulutuksen aiheuttamat päästöt koko tarkastelujakson ajalta ovat noin 28 kg eli noin 67%. Eristerappauksen vaikutus on noin 14 kg eli 24%. Laastipaikkauksen ja huoltomaalauksen vaikutukset kasvihuonepäästöihin ovat pienet.

Strategian 2, eristerappaus, kokonaispäästöt tarkastelujakson aikana ovat samalla tasolla kuin strategialla 1, noin 55 kg. Tästä lämmitysenergian aiheuttamat päästöt ovat suurimmat (35 kg) ja kattavat noin 64% kaikista päästöistä tarkastelujakson aikana.

Strategian 3 elementtien ja lämmöneristeiden vaihto tuottaa eniten päästöjä kaikista kolmesta korjausvaihtoehdosta. Yhteensä noin 202 kg:n päästöistä noin 148 kg eli

73%:a tulee uusien kuorien tuottamisesta. Energiankulutuksesta syntyvät päästöt ovat samat strategian 2 kanssa.



**Kuva 4.6 Toimistorakennuksen korjausstrategioiden kasvihuonekaasupäästöt hiilidioksidiekvivalenteina julkisivuneliötä kohti 40 vuoden aikana**

Toimistorakennuksessa materiaalien valmistuksesta ja uudelleen sijoituksesta aiheutuvat päästöt ovat kilomäärältään samat kuin asuinkerrostalossa, sillä tarkastelu tehtiin julkisivuneliötä kohti. Kuitenkin energiankulutus on toimistorakennuksessa suurempi, joten energiankulutus ottaa suuremman siivun suhteellisista päästöistä kaikissa korjausstrategioissa.

Strategian 1 päästöt ovat noin 81 kg hiilidioksidiekvivalenttia. Energiankulutuksen aiheuttamat päästöt koko tarkastelujakson ajalta ovat noin 62 kg eli noin 77%. Strategian 2 kokonaispäästöt ovat noin 77 kg. Tästä lämmitysenergian aiheuttamat päästöt ovat 57 kg ja kattavat noin 74% kaikista päästöistä tarkastelujakson aikana. Strategian 3 yhteensä noin 224 kg:n päästöistä noin 57 kg eli 25%:a aiheutuu lämmityksestä. Silti suurimman osuuden strategian 3 päästöistä tuottaa uusien elementtien teko, noin 66%.



## 4.5 Herkkyystarkastelu

### 4.5.1 Energiankulutus

Energiankulutuksen simuloinnin tulosten heilahtelua tarkasteltiin asuinkerrostalon mallin avulla. Tarkastelu tehtiin ohjelman tarkkuuden ja mallinnustavan näkökulmasta. Molempia näkökulmia tarkasteltiin erikseen ja lopuksi tehtiin yhdistetty tarkastelu muuttujien vaikutuksesta. Tulokset on esitetty taulukossa 4.1. Lähtötietojen tarkkuuden vaikutus tuloksiin on esitetty kohdassa 4.1.

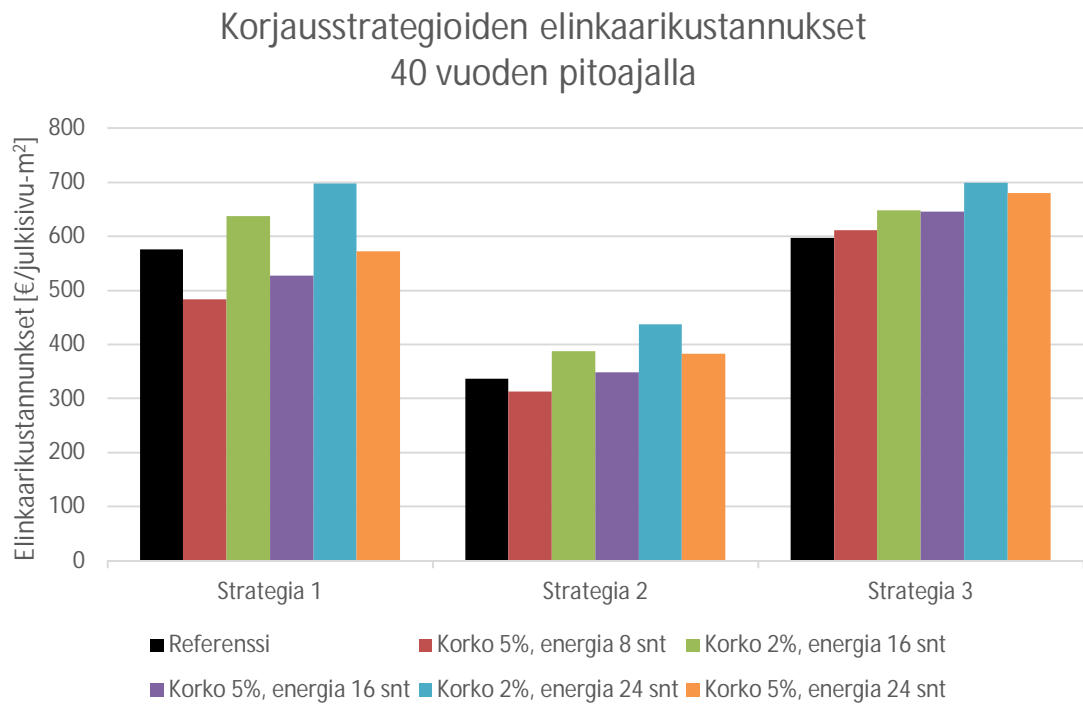
**Taulukko 4.1 Ohjelman tarkkuuden ja mallinnustavan vaikutukset energiasimuloinnin tuloksiin**

Herkkyystarkastelu		[MWh]	[%]
Ohjelman tarkkuus	Dynaaminen	237	0
	Aika-askel 1h	238	0,4
	Dynaaminen ja aika-askel 1 h	238	0,4
Mallinnustapa	Suojatun rakennuksen painekertoimet	237	0
	Suojaamattoman rakennuksen painekertoimet	239	0,8
Ohjelman tarkkuus ja mallinnustapa	Dynaaminen ja aika-askel 1 h	237	0
	Suojatun rakennuksen painekertoimet		
	Dynaaminen ja aika-askel 1 h	239	0,8
	Suojaamattoman rakennuksen painekertoimet		

Tarkastelun perusteella ei havaittu merkittävää tulosten muutosta. Suurin vaikutus tuloksiin näyttäisi olevan lähtötietojen tarkkuudella, kuten kuvassa 4.1 on esitetty.

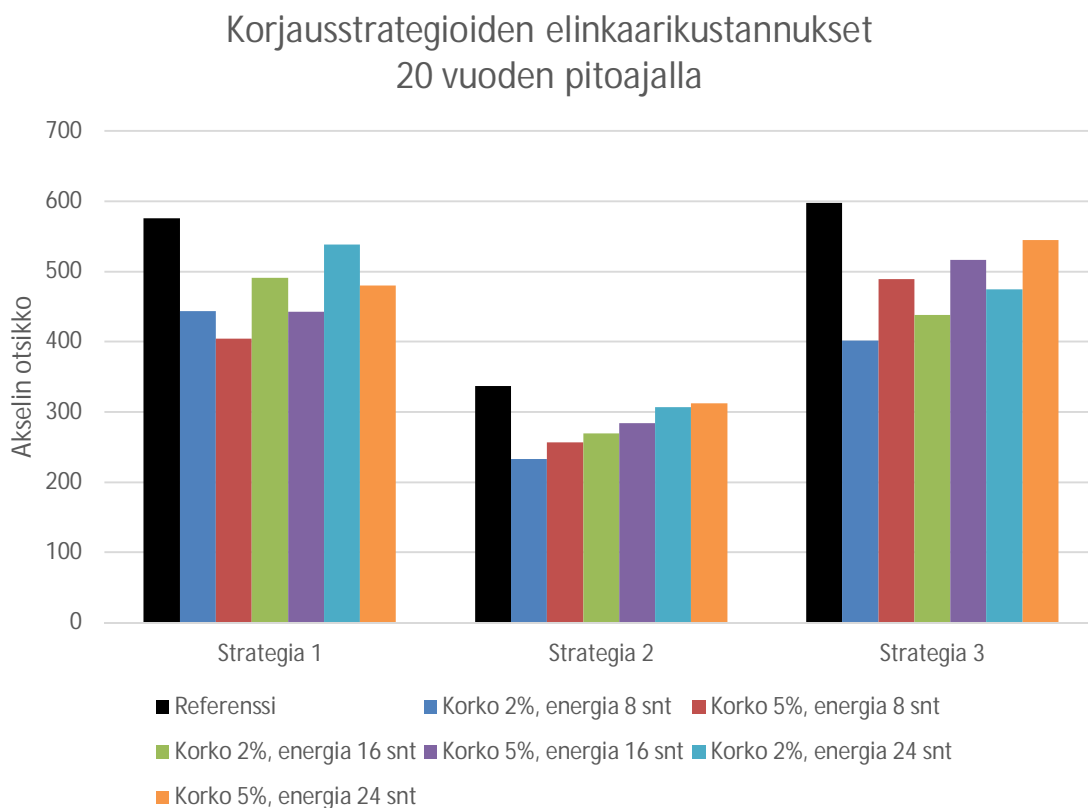
### 4.5.2 Kustannukset

Asuinkerrostalon elinkaarikustannusten herkkyystarkastelu on esitetty kuvissa 4.7 ja 4.8. Tarkastelussa muuttujia olivat laskentakorko, energiahinta ja pitoaika. Tarkastelu jaettiin kahteen osaan pitoajan mukaan, ja tarkastelu tehtiin korjausstrategiakohtaisesti. Kuvissa mustalla esitetyt pylväät ovat kohdassa 4.4 lasketut referenssilaskennan arvot (pitoaika 40 vuotta, laskentakorko 2% ja energiahinta 8 snt/kWh).



***Kuva 4.7 Korjausstrategioiden elinkaarikustannusten herkkyytarkastelu 40 vuoden pitoajalla***

Kaikille korjausstrategioille edullisinta on, kun oletetaan, että energianhinta pysyy nykyisellään. Kuitenkin energianhinnan voidaan olettaa kasvavan tulevaisuudessa, jolloin myös elinkaarikustannukset kasvavat. Korkokantaa vaihtamalla taas havaitaan, että strategia 3 on vakain ja siihen sisältyy vähiten riskiä. Suurin vaikutus korkokannan vaihtamisella on strategiaan 1, koska siihen kuuluvat myöhemmät korjaustoimenpiteet (eristerrappaus) ovat merkittävät.



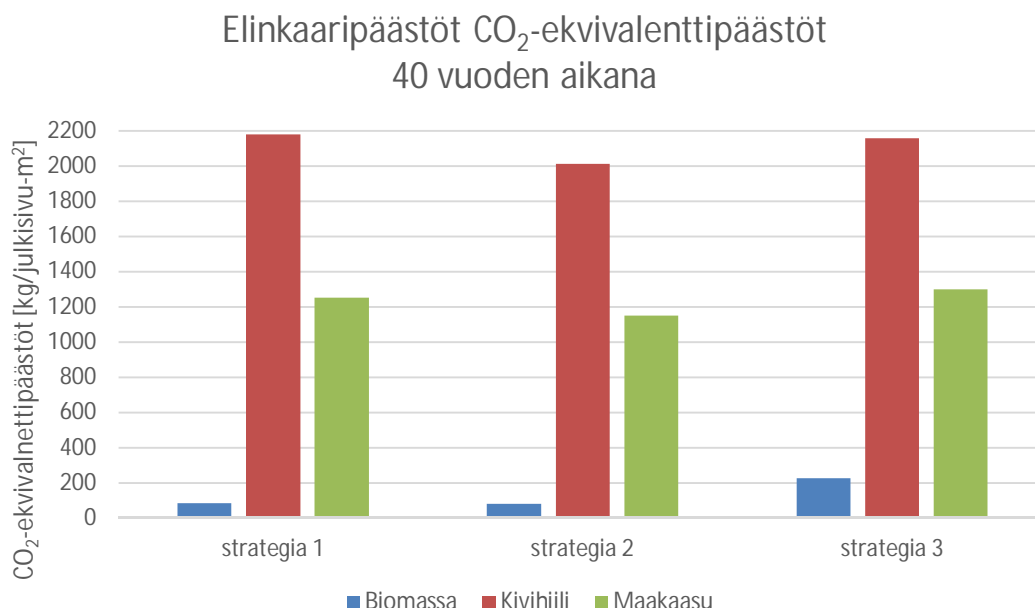
**Kuva 4.8 Korjausstrategioiden elinkaarikustannusten herkkyystarkastelu 20 vuoden pitoajalla**

20 vuoden pitoaika vaikuttaa olevan 40 vuoden pitoaikaa edullisempi vaihtoehto. Tämä johtuu siitä, että 20 vuoden kohdalla rakenteilla on vielä käyttöikä jäljellä, ja siitä, että mitä kauempana tulevaisuudessa tulot ja kustannukset ovat, sitä pienempinä ne diskontautuvat nykyhetkeen.

Tällä tarkastelulla strategia 2 säilyttää edullisimman ratkaisun paikan. Huomioitavaa on, että 20 vuoden pitoajalla ja 2% laskentakorkokannalla strategiasta 3 tulee toiseksi halvin vaihtoehto.

### 4.5.3 Päästöt

Kaukolämmön kolmea pääpolttoainetta Suomessa vertailtiin päästöjen aiheuttajina. Laskennan tulokset on esitetty kuvassa 4.9.



**Kuva 4.9 Elinkaaripäästöjen vertailu kaukolämmön tuotannon eri polttoaineilla**

Biomassaa käytettiin tutkimuksen varsinaisessa osassa strategioiden päästöjen vertailussa. Kivihiilen ja maakaasun aiheuttamat päästöt ovat moninkertaisesti suurempia ja energiankulutuksesta aiheutuvat päästöt aiheuttavat selvästi materiaaleja enemmän päästöjä. Kokonaispäästöt ja energiankulutuksen aiheuttamat päästöt on taulukoitu korjausstrategia- ja polttoainekohtaisesti taulukkoon 4.2.

**Taulukko 4.2 Korjausstrategioiden päästöt toimistorakennukselle kaukolämmön eri polttoaineilla**

	Biomassa		Kivihiili		Maakaasu	
	Energia [kg]	Kokonais [kg]	Energia [kg]	Kokonais [kg]	Energia [kg]	Kokonais [kg]
strategia 1	62	81	2 160	2 179	1 231	1 250
strategia 2	57	77	1 990	2 010	1 130	1 150
strategia 3	57	224	1 990	2 157	1 130	1 297

Kivihiilellä tuotettuna lämmitykseen kuluvaan energian päästöt ovat jokaisessa korjausstrategiassa yli 90%. Strategioille 1 ja 2 luku on noin 99 % ja strategialle 3 92 %. Maakaasulla tuotettuna lämmitykseen kuluvaan energian päästöjen osuus on strategioille 1 ja 2 noin 98% ja strategialle 3 noin 87%. Strategiassa 3 osuus on pienempi kuin kahdessa muussa, koska uusien elementtien tuotanto aiheuttaa tuntuvasti päästöjä. Biomassan käyttö on näistä vertailuista polttoaineista selkeästi vähäpäästöisin, joten valittaessa tämä energiantuotantotapa korjausstrategioiden vertailussa korostuvat myös niiden materiaalivalinnat.

## 5. JOHTOPÄÄTÖKSET

### 5.1 Tulosten tarkastelu

#### **Energia**

Mallin kalibroinnissa havaittiin, että julkisivujen tarkka mallintaminen ja kerroksiin jakaminen ovat tarpeellisia halutun tarkkuuden saavuttamiseksi. Suurin vaikutus mallin tarkkuuteen on kerroksiin jakamisella, vaikka rakennuksen geometriaa ei olisi mallinnettu tarkasti. Mallinnuksen herkkyystarkastelussa ei havaittu ohjelman tarkkuuden tai mallinnustavan vaikuttavan simuloinnin tuloksiin. Mallinnusjärjestys ei kuitenkaan ollut julkisivutarkastelulle optimaalisin.

Korjausratkaisuista energiatehokkaimpia olivat strategiat 2 ja 3. Molemmissa saavutettiin sama ulkoseinän U-arvo ja energiankulutukseen vaikuttavat korjaukset tehtiin samaan aikaan. Strategian 3 etuna on kuitenkin se, että koska kaikki eristeet vaihdetaan, rakenteen paksuus on 20 mm vähemmän kuin strategialla 2. Tällainen ero ei kuitenkaan ole reaalityönteossa merkittävä.

#### **Kustannukset**

Strategia 2 on elinkaarikustannuksiltaan selkeästi edullisin korjausratkaisu. Strategian hinta julkisivuneliötä kohti oli noin 340 € Strategia 1 oli seuraavana noin 580 €/julkisivu-m<sup>2</sup> ja strategia 3 noin 600 €. Strategia 2 piti edullisimman korjausratkaisun paikan myös kustannusten herkkyystarkastelun aikana kaikilla variaatioilla molemmissa kohteissa. Strategia 3 tulee edullisemmaksi vaihtoehdoksi kuin strategia 1 20 vuoden pitoajalla ja 2% laskentakorkokannalla.

#### **Päästöt**

Strategia 3 on selvästi kahta muuta korjausratkaisua saastuttavampi. Se tuotti yli kolminkertaisen määrän hiilidioksidiekvivalenteja toisiin strategioihin nähden. Ero syntyi kuo-rielementtien tuotannosta. Strategia 1 ja 2 ovat päästöjen tuotossa samalla tasolla. Kun biomassa vaihdettiin kivihiiileen tai maakaasuun, materiaalien tuotannosta syntyvät päästöt jäivät suhteessa pieniksi energiankulutuksesta aiheutuvien päästöjen rinnalla. Kivihii-  
lellä tuotettaessa strategiasta 1 tulee kaikista saastuttavin vaihtoehto.

### 5.2 Tutkimuksen tarkastelu

Tämän tutkimuksen perusteella voitaisiin sanoa, että tarkasteltavista vaihtoehtoista eris-terappaus on elinkaarikustannuksiltaan ja ympäristövaikutuksiltaan paras korjausstrate-gia. Korjaushankkeen tilaajalle kustannukset ovat usein merkittävä tai jopa ainoa korjaus-tavan vertailukohde. Kuitenkin, mikäli kustannukset ovat lähellä toisiaan tai kun vihreät arvot ovat tilaajan intressejä, energiankulutustiedolla ja päästöjen osoittamisella voidaan

vaikuttaa positiivisesti ympäristön kannalta korjaustavan valintaan. Vihreät arvot kasvatavat suosiotaan osin määräysten pakottamina ja osin ihmisten valveutumisena. Lisäksi elinkaarikustannusten osoittaminen investointikustannusten sijasta on pitkällä tähtäimellä erityisesti tilaajan etu.

Rakennusten lämmitysmuoto tiedettiin olevan kaukolämpö. Kaukolämmöntuotannossa käytettyä polttoainetta ei kuitenkaan tiedetty ja tutkimuksessa käytettiin kolmea yleisintä polttoainetta Suomessa. Kuten tutkimuksessa osoitettiin, polttoaineella on suuri merkitys päästöjen aiheutumiseen. Jos polttoaine on joku muu kuin tutkimuksessa käytetty, tuloksetkin muuttuvat. Esimerkiksi sekundäärilämpö on tuotantolaitoksissa syntyvää hukkalämpöä, jonka päästöt ovat hyvin alhaiset.

Asuinkerrostalossa epävarmuutta lisäsi se, että rakennuksen lämmitykseen käytetty energia jouduttiin arvioimaan. Rakennuksen energiakulutus on käyttäjistä riippuvaista ja mikäli rakennuksen asukkaat käyttävät runsaasti lämmintä vettä, rakennuksen lämmitykseen käytetyn energian osuus on pienempi. Toisaalta käyttäjät voivat pitää ikkunoita ja ovia auki, jolloin lämmitysenergian osuus kasvaa.

Korjausstrategioiden menekit jouduttiin osittain arvioimaan täysin omavaltaisesti. Rakennusten korjausten laajuus pyrittiin arvioimaan suureksi, jotta strategit olisivat vertailukelpoisia keskenään. Tämä vaikutti erityisesti paikkakorjaukseen, sillä sen menekit kasvoivat ehkä tavalliseen paikkakorjaukseen verrattuna. Menekkien kasvu vaikutti erityisesti paikkakorjauksen päästöihin ja kustannuksiin. Jos materiaaleja oltaisiin arvioitu vähemmän, strategia 1 olisi voinut olla kustannuksiltaan lähempänä strategiaa 2. Jo tällä vertailulla strategia 1 oli päästöiltään strategian 2 kanssa samalla tasolla. Energiatehokkuuteen menekkien muutoksilla ei olisi kuitenkaan voitu vaikuttaa.

Energiasimuloinnin kalibrointi olisi kannattanut tehdä eri järjestyksessä. Mallintaminen on kannattavaa aloittaa laatikko-mallista, mutta siitä tulisi siirtyä julkisivun geometrian tarkennukseen. Kerrokset, tilat ja muut rakennuksen sisällä vaikuttavat tekijät on julkisivutarkastelussa tarkoituksen mukaista mallintaa vasta sitten, kun tarkkuutta vaaditaan lisää. Mikäli mallintaminen oltaisiin tehty tässä järjestyksessä, olisi mahdollisesti voitu säästää myös mallinnusaikaa, jos jokin malli oltaisiin voitu jättää tekemättä.

Elinkaariarvioinnissa otettiin huomioon vain korjausstrategioiden materiaaleista syntyvät päästöt sekä rakennuksen operoinnin aikana lämmitysenergiankulutuksen aiheuttamat päästöt. Tutkimuksesta rajattiin pois materiaalien kuljetuksesta aiheutuvat päästöt. Lisäksi korjausten aikana käytettyjen koneiden aiheuttamia pakokaasupäästöjä tai laitteiden kuluttamasta sähköstä aiheutuvia päästöjä ei otettu huomioon. Kaikki rakennusmateriaalit oltaisiin saatu Suomesta ja rakennusaika on rakennuksen operaatioaikaan nähden lyhyt. Näin näillä rajauksilla on todennäköisesti pieni merkitys. Tutkimuksesta rajattiin pois myös käyttöveden lämmityksen ja taloussähkön tuotannon aiheuttamat päästöt, sillä tarkastelu tehtiin julkisivukorjauksen vaikutuksesta rakennuksen lämmitysenergiaan.

Tutkimuksessa jouduttiin tekemään myös yksinkertaistuksia, joilla on kuitenkin tuloksiin nähden pieni merkitys. Energiasimuloinnissa käytettiin Suomen rakentamismääräyskokoelman mukaisia rakenteita niille rakenteille, joiden ei uskottu vaikuttavan

energiasimulointiin julkisivujen kannalta. Lämmitysjärjestelmänä käytettiin ideaalista järjestelmää, eli rakennukseen ei sijoitettu lämmityspäätelaitteita vaan ohjelmalle ilmoitettiin tarvittu lämmitysmäärä. Tämä jouduttiin iteroimaan useiden simulointien aikana huolehtien, että sisällä rakennuksessa oli riittävä lämpötila. Simuloinnissa ei otettu huomioon sisäistä lämpökuormaa, joka aiheutuu ihmisistä ja laitteista. Näin simuloimalla saadaan suurempia lämmitystarpeita kuin oikeasti. Lisäksi rakennusten kellarit jätettiin mallintamatta. Todellisuudessa kellareita joudutaan lämmittämään jonkun verran, jolloin simuloimalla saadaan oikeaa tilannetta pienempi kulutus.

### 5.3 Jatkotutkimusehdotukset

Ideaalitulanteessa rakennuksen koko vaippa korjataan samalla kerralla. Jatkotutkimuksena voisi tutkia alkuperäisen vesikaton ja ikkunoiden uusimisen vaikutusta energiankulutukseen ja päästöjen syntymiseen. Varsinkin ikkunoiden merkitys energiankulutukseen on merkittävä, sillä ikkunoiden U-arvo on merkittävästi ulkoseinän ja muun vaipan U-arvoa suurempi. Merkitys on sitä suurempi, mitä enemmän julkisivuilla on lasitettua pinta-alaa. Myös vesikaton lisälämmöneristämisen merkitys on sitä suurempi mitä suurempi katon pinta-ala on. Varsinkin matalilla ja laajoilla rakennuksilla yläpohjan kautta haihtuvan lämmön osuus voi olla suuri.

Tässä tutkimuksessa vertailtiin kolmea korjausstrategiaa keskenään kahdelle rakennukselle. Mielenkiintoista voisi olla verrata yhtä korjausstrategiaa useaan saman tyyppiseen rakennukseen ja nähdä, voidaanko vetää yleistystä energiankulutuksen pienentämisessä tai päästöjen leikkaamisessa. Toisaalta usean strategian vertailulla voitaisiin arvioida myös korjauskustannusten suhdetta. Kuitenkin korjausten kustannukset, energiankulutuksen säästö ja päästöjen leikkaaminen ovat kohdekohtaisia, mutta tutkimuksen tuloksena voitaisiin saada suuntaviivoja hankesuunnittelun tueksi.

## LÄHDELUETTELO

A-Insinöörit Suunnittelu Oy, 2015. *Julkisivu- ja parvekerakenteiden kuntotutkimus*, Tampere: A-Insinöörit Suunnittelu Oy.

Arkkitehtitoimistojen Liitto ATL ry et al, 2014. *Elinkaarisuunnittelun tehtäväluettelo ELINK12*, s.l.: Rakennustieto Oy.

Equa simulation ab, 2017. [Online]  
Available at: <http://www.equa.se/fi/>  
[Haettu 14 huhtikuu 2017].

Euroopan komissio, 2012. *Eurooppa 2020*. [Online]  
Available at: [http://ec.europa.eu/europe2020/europe-2020-in-a-nutshell/priorities/sustainable-growth/index\\_fi.htm](http://ec.europa.eu/europe2020/europe-2020-in-a-nutshell/priorities/sustainable-growth/index_fi.htm)  
[Haettu 7 marraskuu 2016].

Euroopan komissio, 2013. *Eurooppa 2020 -strategia Suomessa*. [Online]  
Available at: [http://ec.europa.eu/europe2020/europe-2020-in-your-country/finland/progress-towards-2020-targets/index\\_fi.htm](http://ec.europa.eu/europe2020/europe-2020-in-your-country/finland/progress-towards-2020-targets/index_fi.htm)  
[Haettu 7 marraskuu 2016].

Euroopan parlamentti, 2010. *2010/31/EU*, s.l.: Rakennustietosäätiö RTS 2014.

Eurostat, 2017. *Energy price statics*. [Online]  
Available at: [http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy\\_price\\_statistics](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Energy_price_statistics)  
[Haettu 23 Tammikuu 2017].

Haukijärvi, M., 2005. *Betonijulkisivut: Verhoukorkorjaukset*. [Online]  
Available at: <http://www.julkisivuyhdistys.fi/julkkari2/juko/betonijulkisivut.html>  
[Haettu 24 Tammikuu 2017].

Haukijärvi, M., 2005. *Betonijulkisivut: Pinnoitus- ja paikkauskorjaukset*. [Online]  
Available at: <http://www.julkisivuyhdistys.fi/julkkari2/juko/betonijulkisivut.html>  
[Haettu 23 Tammikuu 2017].

Haukijärvi, M., 2006. *Betonijulkisivut: Purkaminen ja uudelleenverhous*. [Online]  
Available at: <http://www.julkisivuyhdistys.fi/julkkari2/juko/betonijulkisivut.html>  
[Haettu 24 Tammikuu 2017].

Heljo, J. N. E. & N. H., 2005. *Rakennusten energiankulutus ja CO2-ekv päästöt Suomessa*, Tampere: s.n.



Motiva, 2016. *Kaukolämpö*. [Online]

Available at: <http://www.motiva.fi/kaukolampo>

[Haettu 23 Tammikuu 2017].

Mäkitalo, E. & Hilliaho, K., 2013. *Korjaustoimenpiteiden energiasäästövaikutusten arviointi energiasimulointien avulla*. s.l., s.n., pp. 281-288.

Rakennusvalvonta Oulu, 2013. *Ikkunakorjaus*. [Online]

Available at: <http://www.energiakorjaus.info/pientalot/tekniset-kortit/>

[Haettu 17 Maaliskuu 2017].

Raksystems Anticimex, 2009. *Kuntoarvioraportti*, s.l.: Raksystems Anticimex.

Sika, 2014. *SikaHyflex-250 Facade*. [Online]

Available at:

[http://fin.sika.com/fi/solutions\\_products/Documents/PDS/productfamily/Hyflex.html](http://fin.sika.com/fi/solutions_products/Documents/PDS/productfamily/Hyflex.html)

[Haettu 27 Maaliskuu 2017].

Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2006. *SFS-EN ISO 14040*. [Online]

Available at: [Rajoitettu](#)

[Haettu 6 Helmikuu 2017].

Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2006. *SFS-EN ISO 14044*. [Online]

Available at: [Rajoitettu](#)

[Haettu 6 Helmikuu 2017].

Tilastokeskus, 2011. *EU 2020 -tavoitteet nojautuvat laajaan indikaattorituotantoon*. [Online]

Available at: [http://www.stat.fi/artikkelit/2011/art\\_2011-09-26\\_007.html?s=0#1](http://www.stat.fi/artikkelit/2011/art_2011-09-26_007.html?s=0#1)

[Haettu 7 marraskuu 2016].

Tilastokeskus, 2015. *Rakennuskanta 2014*. [Online]

Available at: [http://www.stat.fi/til/rakke/2014/rakke\\_2014\\_2015-05-28\\_kat\\_002\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/rakke/2014/rakke_2014_2015-05-28_kat_002_fi.html)

[Haettu 7 marraskuu 2016].

Tilastokeskus, 2016. *Asunnon omistajat ja asunto-osakeyhtiöt korjasivat yli kuudella miljardilla eurolla vuonna 2015*. [Online]

Available at: [http://www.stat.fi/til/kora/2015/01/kora\\_2015\\_01\\_2016-08-29\\_tie\\_001\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/kora/2015/01/kora_2015_01_2016-08-29_tie_001_fi.html)

[Haettu 7 marraskuu 2016].

Tilastokeskus, 2016. *Kaukolämmön hinta kuluttajatyypeittäin*. [Online]

Available at:

[http://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin\\_ene\\_ehi/080\\_ehi\\_tau\\_108\\_fi.px/?rxid=c747b2f7-6b07-487d-8b37-c56bb4f8b505](http://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin_ene_ehi/080_ehi_tau_108_fi.px/?rxid=c747b2f7-6b07-487d-8b37-c56bb4f8b505)

[Haettu 23 Tammikuu 2017].

Tilastokeskus, 2016. *Liitetaulukko 2. Rakennukset käyttötarkoituksen mukaan vuosina 1980-2015*. [Online]

Available at: [http://www.stat.fi/til/rakke/2015/rakke\\_2015\\_2016-05-26\\_tau\\_002\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/rakke/2015/rakke_2015_2016-05-26_tau_002_fi.html) [Haettu 7 marraskuu 2016].

Tilastokeskus, 2016. *Rakennuskanta 2015*. [Online]

Available at: [http://www.stat.fi/til/rakke/2015/rakke\\_2015\\_2016-05-26\\_kat\\_002\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/rakke/2015/rakke_2015_2016-05-26_kat_002_fi.html) [Haettu 7 marraskuu 2016].

Ympäristöministeriö, 2011. *Rakennusten energiatehokkuus, määräykset ja ohjeet 2012*, s.l.: Ympäristöministeriö, rakennetun ympäristön osasto.

Ympäristöministeriö, 2013. *Ympäristöministeriön asetus rakennuksen energiatehokkuuden parantamisesta korjaus- ja muutostöissä*, s.l.: Rakennustieto Oy.